

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando



Proyecto Fin de Carrera

Jesús Pareja Estalrrich

100074270

Ingeniería Superior Industrial:

Mecánica de Máquinas y Estructuras

Tutor del proyecto: Eduardo Corral Abad

Índice

Índice	2
Índice de Imágenes	4
Índice de tablas	5
Índice de gráficas.....	6
Motivación a realizar el proyecto.....	7
Objetivos del proyecto	8
Fases del proyecto.....	9
Estructura del documento	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	11
Definición e historia de los UGV:.....	12
Tipos de UGV:.....	13
Ejemplos de UGV.....	14
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
Introducción al problema.....	17
Introducción al programa matemático utilizado	17
Hipótesis y simplificaciones	18
Modelo de Estudio	18
CAPÍTULO III: DESARROLLO TEÓRICO.....	20
Cinemática.....	21
Dinámica.....	24
CAPÍTULO IV: DESARROLLO EN MATLAB.....	29
Introducción a Matlab R2009a.....	30
Cinemática.....	31
Dinámica.....	45
Diagrama de flujo	47
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	49
Función Recta	51
Función parábola.....	57
Función montaña	65
Función Seno	72
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	80
Conclusiones	81
Trabajos futuros	82
Bibliografía	83
Anexos	86

Algoritmo para optimizar los ángulosde ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Anexo1. Glosario	87
Anexo 2. Código de programación.....	89
Código de Algoritmo principal.....	89
Algoritmo para calcular todos los caminos	95
Anexo 3. Tablas de resultados.....	97
Función suelo Parábola	97
Función suelo Montaña.....	106
Función suelo Seno	115

Índice de Imágenes

Imagen 1. UGV PACKBOT	14
Imagen 2. UGV THE TALON en una misión de campo.....	15
Imagen 3. UGV Gladiator	15
Imagen 4. Criterios de signo.....	18
Imagen 5. Esquema básico del UGV.....	18
Imagen 6. Parámetros del cuadrilátero interno.....	21
Imagen 7. Definición geométrica del UGV	24
Imagen 8. Definición del sistema 1	25
Imagen 9. Definición del sistema 2	25
Imagen 10. Definición del sistema 3	26
Imagen 11. Punto de contacto de la rueda y la trayectoria.....	34
Imagen 12. Parámetros del cuadrilátero interno.....	34
Imagen 13. Configuración angular para $A_t=40$ y $A_d=80$	36
Imagen 14. Configuración angular para $A_t=80$ y $A_d=140$	37
Imagen 15. Configuración angular para $A_t=20$ y $A_d=160$	37
Imagen 16. Configuración angular para $A_t=180$ y $A_d=0$	37
Imagen 17. Configuración angular para $A_t=160$ y $A_d=120$	38
Imagen 18. Configuración angular para $A_t=40$ y $A_d=160$	38
Imagen 19. Cálculo cdg rueda trasera: puntos cercanos al cdg de la rueda delantera	39
Imagen 20. Cálculo de la distancia d	40
Imagen 21. Cálculo cdg rueda trasera. $d < D(a,b)$	40
Imagen 22. Cálculo cdg rueda trasera: $d > D(a,b)$	41
Imagen 23. Cálculo cdg rueda trasera: Distribución de los puntos.....	41
Imagen 24. Cálculo cdg rueda trasera: $d = d(v)$	42
Imagen 25. Cálculo cdg rueda trasera: $d = d(v+1)$	43

Índice de tablas

Tabla 1. Dimensiones y masas del modelo	19
Tabla 2. Dimensiones y masas del UGV	31
Tabla 3. Dimensiones vehículo para comprobación del cuadrilátero.....	35
Tabla 4. Valores de μ_2	35
Tabla 5. Valores del ángulo C.....	35
Tabla 6. Valor de D. Distancia entre los cdg de la ruedas	36
Tabla 7. Ejemplo de cálculo del cdg de la rueda trasera.....	43
Tabla 8. Valores de la constante A	50
Tabla 9. Resultados función suelo recta $f=0.25 \cdot x$	52
Tabla 10. Resultados función suelo recta $f=0.5 \cdot x$	54
Tabla 11. Resultados función suelo recta $f=0.75 \cdot x$	56
Tabla 12. Función suelo Parábola Resumen datos de los resultados	64
Tabla 13. Función suelo Montaña Resumen datos de los resultados.....	71
Tabla 14. Función suelo Seno Resumen datos de los resultados.....	74
Tabla 15. Par mínimo función Parábola con $A=0,1$	97
Tabla 16. Par mínimo acotado función Parábola con $A=0,1$	98
Tabla 17. Par máximo función Parábola con $A=0,1$	99
Tabla 18. Par mínimo función Parábola con $A=0,15$	100
Tabla 19. Par mínimo acotado función Parábola con $A=0,15$	101
Tabla 20. Par máximo función Parábola con $A=0,15$	102
Tabla 21. Par mínimo función Parábola con $A=0,2$	103
Tabla 22. Par mínimo acotado función Parábola con $A=0,2$	104
Tabla 23. Par máximo función Parábola con $A=0,2$	105
Tabla 24. Par mínimo función montaña con $A=0,1$	106
Tabla 25. Par mínimo acotado función montaña con $A=0,1$	107
Tabla 26. Par máximo función montaña con $A=0,1$	108
Tabla 27. Par mínimo función montaña con $A=0,15$	109
Tabla 28. Par mínimo acotado función montaña con $A=0,15$	110
Tabla 29. Par máximo función montaña con $A=0,15$	111
Tabla 30. Par mínimo función montaña con $A=0,2$	112
Tabla 31. Par mínimo acotado función montaña con $A=0,2$	113
Tabla 32. Par máximo función montaña con $A=0,2$	114
Tabla 33. Par mínimo función seno con $A=0,1$	115
Tabla 34. Par mínimo acotado a 20 grados función seno con $A=0,1$	116
Tabla 35. Par mínimo acotado a 30 grados función seno con $A=0,1$	117
Tabla 36. Par mínimo acotado a 40 grados función seno con $A=0,1$	118
Tabla 37. Par máximo función seno con $A=0,1$	119

Índice de gráficas

Gráfica 1. Representación función suelo. Recta $f = 0,25 \cdot x$	51
Gráfica 2. Representación función suelo. Recta $f = 0,5 \cdot x$	53
Gráfica 3. Representación función suelo. Recta $f = 0,75 \cdot x$	55
Gráfica 4. Representación función suelo. Parábola $f = (0,10 \cdot ((x-4)^2)) + 2$	57
Gráfica 5. Parábola 0,10 mínimo par	58
Gráfica 6. Parábola 0,10 mínimo par acotado	58
Gráfica 7. Parábola 0,10 Diferencias en el par	59
Gráfica 8. Representación función suelo. Parábola $f = (0,15 \cdot ((x-4)^2)) + 2$	60
Gráfica 9. Parábola 0,15 mínimo par	60
Gráfica 10. Parábola 0,15 mínimo par acotado	61
Gráfica 11. Parábola 0,15 Diferencias en el par	61
Gráfica 12. Representación función suelo. Parábola $f = (0,20 \cdot ((x-4)^2)) + 2$	62
Gráfica 13. Parábola 0,20 mínimo par	62
Gráfica 14. Parábola 0,20 mínimo par acotado	63
Gráfica 15. Parábola 0,20 Diferencias de par	63
Gráfica 16. Representación función suelo. Montaña $f = (0,1 \cdot (\exp(-(x-4)^2))) + 2$	65
Gráfica 17. Montaña 0,10 mínimo par	65
Gráfica 18. Montaña 0,10 mínimo par acotado	66
Gráfica 19. Montaña 0,10 Diferencia de par	67
Gráfica 20. Representación función suelo. Montaña $f = (0,15 \cdot (\exp(-(x-4)^2))) + 2$	67
Gráfica 21. Montaña 0,15 mínimo par	68
Gráfica 22. Montaña 0,15 mínimo par acotado	68
Gráfica 23. Montaña 0,15 Diferencia de par	69
Gráfica 24. Representación función suelo. Montaña $f = (0,2 \cdot (\exp(-(x-4)^2))) + 2$	69
Gráfica 25. Montaña 0,20 mínimo par	70
Gráfica 26. Montaña 0,20 mínimo par acotado	70
Gráfica 27. Montaña 0,20 Diferencia de par	71
Gráfica 28. Representación función suelo. Seno $f = (0,10 \cdot \sin(4 \cdot X)) + 2$	72
Gráfica 29. Seno mínimo par	72
Gráfica 30. Seno mínimo par acotado 20 grados	73
Gráfica 31. Seno Diferencia de mínimo par acotado 20 grados	73
Gráfica 32. Seno mínimo par acotado 30 grados	74
Gráfica 33. Seno Diferencia de mínimo par acotado 30 grados	75
Gráfica 34. Seno Diferencia entre acotado de 20 y 30 grados	75
Gráfica 35. Seno mínimo par acotado 40	76
Gráfica 36. Seno Diferencia de mínimo par acotado 40 grados	76
Gráfica 37. Seno Diferencia de par 20, 30 y 40	77
Gráfica 38. Seno mínimo Par acotado 50 grados	77
Gráfica 39. Seno Diferencias de par entre 20, 30, 40 y 50 grados	78
Gráfica 40. Seno Diferencias de par entre 20, 50 y par mínimo	78

Motivación a realizar el proyecto

La motivación principal del proyecto es intentar conseguir que la autonomía del UGV aumente optimizando el vehículo ya existente. Esto se puede llevar a cabo aprovechando una de las características principales del UGV, la posibilidad de variar los ángulos de ataque de las ruedas, de tal forma que en cada momento este puede tomar la configuración de ángulos que más le convenga en función de las características del terreno en el que se encuentre y la característica de contar con un motor en cada una de las mismas.

La optimización de los ángulos de ataque del UGV es muy importante, ya que además de la pendiente de la trayectoria, hay otros factores muy importantes que influyen en el par necesario para que el vehículo se mueva, entre los que se encuentran los ángulos de ataque. Por esto, variando los ángulos de ataque, el vehículo puede tomar la configuración angular que le convenga consiguiendo que para un mismo recorrido, el par necesario sea el mínimo posible dentro de las posibilidades del vehículo. Con esto, el vehículo conseguiría minimizar el consumo de energía eléctrica de las baterías del mismo, lo que directamente significa un aumento en la autonomía del vehículo sin cambiar por ejemplo las baterías y sin modificar las características estructurales ni la masa del vehículo. Esto último es una de las características más importantes debido a la imposibilidad de realizar este tipo de cambios en algunos vehículos.

Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es conseguir optimizar la elección de los ángulos de ataque del UGV definido mediante la variación de los ángulos de ataque de cada uno de sus brazos por separado. Se debe conseguir un algoritmo de cálculo el cual permita al vehículo orientar los ángulos de ataque de sus brazos de forma autónoma. Con tal de conseguir este objetivo principal, se definen los siguientes objetivos:

- Crear un modelo básico del vehículo en 2D que permita desarrollar todo el trabajo de una manera adecuada.
- Calcular un modelo viable, que permita llevar a cabo el análisis y el cálculo cinemático y dinámico del vehículo para cualquier función suelo y cualquier configuración angular del vehículo, con la finalidad de obtener el par necesario que permita al vehículo desplazarse a través de la trayectoria.
- Dotar al modelo de la mayor polivalencia posible, haciendo que pueda ser utilizado para la mayor variedad de tipos de función suelo.
- Crear un algoritmo de programación el cual implemente el modelo y sea además capaz de llevar a cabo una optimización para obtener las configuraciones angulares más óptimas a lo largo de la trayectoria.
- Analizar los resultados y sacar las conclusiones pertinentes.

Fases del proyecto

Con la finalidad de conseguir los objetivos planteados con anterioridad, las fases llevadas a cabo para la consecución de los mismos son:

1. Definición de objetivos:

En esta primera fase se definen los objetivos que se han de haber cumplido una vez realizado el proyecto.

2. Estudio previo:

Antes de empezar a desarrollar el proyecto, es necesario realizar un estudio previo sobre el tema a tratar en el mismo, consultando bibliografía, proyectos y trabajos relacionados.

3. Conceptualización y desarrollo de ideas:

Una vez estudiada toda la información, es el momento de evaluar todas las posibles soluciones considerando todas las ventajas y desventajas de las mismas.

4. Desarrollo:

Se lleva a cabo el desarrollo de la solución elegida. Esta parte tiene dos fases, una primera en la que se lleva a cabo el desarrollo teórico necesario, y una segunda en la que se realiza la implementación del mismo en Matlab.

5. Ejecución del diseño e introducción de mejoras:

Se lleva a cabo la evaluación y ejecución del diseño mediante la prueba del mismo en diversas situaciones que pongan a prueba la estabilidad del mismo. Además, en caso de detectar problemas, se llevará a cabo la resolución del mismo y su implementación en el diseño.

6. Estudio de los resultados:

Una vez validado el diseño, se trabaja sobre los resultados que este aporta con la finalidad de obtener conclusiones sobre los resultados y su uso.

Estructura del documento

La estructura del documento está dividida en seis capítulos, una biografía y tres anexos. Cada capítulo contiene la siguiente información:

- Capítulo I. Introducción.

En este primer capítulo se lleva a cabo una introducción sobre la historia del UGV, origen de los UGV, tipos de UGV y algún ejemplo de UGV conocido.

- Capítulo II. Planteamiento del problema.

Se explica el problema a estudiar y resolver. Se dan datos acerca de las características del mismo y se explican las hipótesis en la que se basa. Además, se lleva a cabo la definición del modelo de estudio y se introducen las herramientas informáticas utilizadas en el proyecto.

- Capítulo III. Desarrollo teórico del proyecto.

En este capítulo se lleva a cabo el desarrollo de toda la base y la teoría necesaria que permite llevar a cabo la resolución del problema.

- Capítulo IV. Desarrollo del programa en Matlab.

Se lleva a cabo la adaptación informática del algoritmo que resuelve el problema a través del software Matlab.

- Capítulo V. Análisis de los resultados.

Se analizan los resultados obtenidos estudiando las posibles ventajas o desventajas de la solución implementada.

- Capítulo VI. Conclusión y trabajos futuros.

Se exponen las conclusiones principales sobre el algoritmo, y se plantean posibles mejoras o modificaciones que se pueden llevar a cabo en futuros trabajos o proyectos.

En los anexos es posible encontrar la siguiente información:

- El anexo 1 contiene toda la nomenclatura necesaria para entender el proyecto.
- En el anexo 2 se puede ver el código de programación en Matlab que implementa el algoritmo.
- En el anexo 3 se encuentran todas las tablas de resultados.

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

Definición e historia de los UGV:

En primer lugar, y para entender bien el concepto de UGV, antes es necesario definir el concepto de vehículo no tripulado. Los vehículos no tripulados son un tipo de vehículos los cuales están diseñados para poder desplazarse y moverse, sin necesidad, como su propio nombre indica, de llevar tripulación a bordo. Para conseguir esto, es necesario dotar a este tipo de vehículos de distintas tecnología y dispositivos que doten al mismo de la autonomía necesaria.

Dentro de este tipo de vehículos, podemos encontrar tres tipos fundamentales de acuerdo al medio que utilizan para moverse. Los tres posibles tipos de vehículos no tripulados serían:

- UUV o Unmanned Underwater Vehicles, son vehículos submarinos no tripulados.
- UAV o Unmanned Aerial Vehicles, que son vehículos aéreos no tripulados.
- UGV o Unmanned Ground Vehicles, que son vehículos terrestres no tripulados.

Como es lógico en este proyecto la atención se va a fijar en el último tipo de vehículo no tripulado, el UGV.

Uno de los orígenes del uso de los UGV fue en el año 1930, en el que la URSS empezó a utilizar un UGV el cual llamaron Teletanks, el cual era un pequeño tanque que solía ser manejado por control remoto desde un tanque convencional. Su función era transportar la munición dentro del campo de batalla sin que los soldados estuviesen en peligro. Fueron utilizados en la Guerra de Invierno contra Finlandia y en el inicio del Frente del Este después de que Alemania invadiese la Unión Soviética en 1941.

También, en 1941, durante la Segunda Guerra Mundial, los británicos desarrollaron una versión de radio control de su tanque de infantería llamado Matilda II, con la finalidad de conseguir destapar la localización de los cañones antitanques del enemigo que estaban ocultos intentando reducir al máximo el número de bajas. Finalmente este proyecto no se llegó a desarrollar debido a la fuerte inversión económica que requería.

Por último, en 1942, los alemanes comenzaron a utilizar un vehículo oruga denominado Goliath, y cuya finalidad era la de llevar a cabo trabajos de demolición a distancia. El vehículo contaba con una carga a bordo de 60 kg de explosivo y era controlado a través de un cable. El vehículo no tuvo un gran éxito debido a sus limitaciones como la dependencia de un cable físico, la escasa protección contra el fuego enemigo y su baja velocidad de desplazamiento.

Estos fueron los primeros usos de los UGV, que como se puede ver en sus inicios fueron utilizados principalmente para tareas militares en las que se intentaban reducir las bajas humanas.

Además de esta tarea, actualmente los principales usos de los UGV son:

- Labores de reconocimiento, salvamento o desactivación de explosivos.
- Labores de ámbito militar (el uso más extendido).
- Labores de descontaminación nuclear. Actualmente se están utilizando en Fukushima.
- Labores de exploración. Vehículo mandado a Marte o a la Luna.

Como se puede deducir de las tareas anteriores, la razón principal de utilización de los mismos es su uso en trabajos o tareas en las cuales la presencia de personas no es recomendable debido a que sus vidas pueden correr peligro.

Tipos de UGV:

El criterio más importante a la hora de clasificar UGV es el método de control del mismo. Hay dos tipos principales de vehículos según esta clasificación; los que son dirigidos por control remoto y, por otro lado, los que son autónomos, es decir, los que son capaces de funcionar por sí mismos. Evidentemente las diferencias entre ambos tipos de vehículo son grandes, siendo los segundos mucho más complejos y caros que los primeros. A continuación se explican ambos tipos de forma más completa:

○ UGV dirigidos mediante control remoto:

Estos UGV son aquellos que a pesar de no llevar ninguna persona a bordo, el control y la conducción del mismo es llevada a cabo por una persona. Estos a su vez pueden ser inalámbricos o por cable (actualmente casi no se utiliza). Se trata de la forma más primaria de UGV, que debido al avance de la automática y la electrónica está siendo poco a poco sustituida. No obstante, a día de hoy, en ciertos tipos de tareas la intervención humana sigue siendo imprescindible.

Algunos ejemplos de este tipo de vehículos son:

- iRobot PackBot
- Foster-Miller TALON
- Remotec ANDROS F6A
- Autónoma Solutions Chaos

○ UGV autónomas:

Este tipo de UGV es de origen más reciente que el anterior, y su manejo es totalmente autónomo, es decir, el vehículo se mueve y se dirige por sí mismo. Estos vehículos, tal y como se puede pensar, van unidos de la mano de la automática y la electrónica moderna y su uso está en pleno desarrollo y expansión. Son equipos que cuentan con una alta tecnología lo que los hace más caros y complejos que los anteriores.

Por poner un ejemplo, un vehículo autónomo como este, debe de llevar una gran cantidad de sensores y sistemas de guiado que le permitan orientarse y moverse por sí mismo sorteando las dificultades del terreno. Además, según el uso para el que haya sido desarrollado, el vehículo puede llevar incorporados una gran cantidad de elementos como detectores de explosivos o alguna herramienta.

Pero lo más importante de este tipo de vehículos, es su sistema de control. Este es el encargado de llevar a cabo el guiado del vehículo mientras se mueve. Puede ser un sistema más o menos complejo, que pueden ir desde sistemas simples que controlen el movimiento del vehículo dentro de una trayectoria cerrada y conocida, hasta complejos sistemas que reciben información en tiempo real desde los sensores del vehículo, siendo necesarios en estos casos un sistema de control que trabaje en tiempo real y que tenga una gran capacidad de procesamiento que haga posible el análisis de datos y la toma de decisiones del vehículo de forma casi instantánea.

Algunos ejemplos de este tipo de vehículos son:

- Vehículos desarrollados para el DARPA Grand Challenge
- Proyecto de coche autónomo de Google
- Evaluación de detección móvil y respuesta
- Coche autónomo de VisLab

Ejemplos de UGV

En este apartado se van a mostrar algunos ejemplos de UGVs empleados a lo largo de la historia y que han tenido cierta importancia o relevancia en ella.

PACKBOT

Este UGV fue utilizado por primera vez en el año 2004. Fueron inicialmente desarrollados para usos en el espacio, aunque finalmente su uso se ha dedicado a labores de tipo militar.

En general este vehículo es controlado por una persona aunque cuenta con determinadas funciones que puede llevar a cabo de forma autónoma como por ejemplo dar marcha atrás a las operaciones llevadas a cabo por su operador, o la posibilidad de poder desactivar bombas gracias un brazo articulado y una cámara incorporada.

Tiene su principal función en la exploración de ruinas y búsqueda de personas, presentado la ventaja de poder guardarse en una mochila facilitando su transporte.

Actualmente se están utilizando en el desarme del reactor nuclear de Fukushima con la finalidad de evitar que las personas entren en contacto con la radiación.



Imagen 1. UGV PACKBOT

THE TALON

Este UGV se utiliza principalmente en la desactivación de bombas. Una de sus características más principales es que es capaz de sumergirse en el agua, aguantando una presión máxima de 100 pies.

Se empezó a utilizar en el año 2000 y desde entonces, se han vendido más de 3000 unidades.

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Su característica más importante, es que es uno de los UGV más rápidos del mercado, siendo capaz de alcanzar una velocidad lo suficientemente alta como para seguir a un soldado corriendo. Además su autonomía es bastante grande, de unos 7 días.



Imagen 2. UGV THE TALON en una misión de campo

GLADIATOR

Se trata de un UGV utilizado por la marina de los Estados Unidos cuyo principal uso es minimizar el riesgo y neutralizar a tiempo las amenazas a la infantería de Marina mediante tareas de exploración/vigilancia y acciones de fuego directo.

Sus características principales son la capacidad de visión tanto de día como de noche, un diseño modular capaz de adaptarse a cualquier configuración, y una alta resistencia al fuego enemigo.

Además, se trata del primer UGV armado, pudiendo llegar a sustituir en según qué casos a los soldados de tierra aumentando su seguridad.



Imagen 3. UGV Gladiator

CAPÍTULO II:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Introducción al problema

En primer lugar para entender bien el proyecto, vamos a llevar a cabo una descripción del problema a resolver en el proyecto, así como de la posible solución que se desarrollará en el mismo.

Ya se ha explicado en el apartado anterior del proyecto qué es un UGV, por lo que no resulta especialmente raro pensar que uno de los principales retos que se encuentran al diseñar o construir un UGV es intentar maximizar la autonomía del vehículo ya que todo lo que en el funciona se alimenta por norma general mediante energía eléctrica.

Además, en el caso de los UGV de tipo autómatas todos los sistemas de control y los sensores encargados del guiado son alimentados también mediante electricidad.

Es por todas estas razones que parece lógico intentar minimizar este consumo de energía eléctrica en la medida de lo posible y siempre intentando que el impacto sobre las características del vehículo sean las menos posibles.

Esto es lo que precisamente se intenta con este proyecto, reducir el consumo de energía eléctrica del vehículo aprovechando las características del vehículo y respetando la configuración actual del mismo. Esto ha sido llevado a cabo mediante la optimización en la elección de los ángulos de ataque de las ruedas, intentando reducir para un mismo recorrido la cantidad de par necesaria para que el vehículo se desplace a través de él, y como consecuencia conseguir también reducir el consumo de energía eléctrica.

No obstante se trata de un estudio complicado ya que para dos posiciones consecutivas en una trayectoria, es posible encontrar dos configuraciones angulares totalmente distintas que sean las que en cada caso consigan minimizar el par y por tanto disminuir el consumo eléctrico en el motor principal. Sin embargo, el movimiento de los motores que hace posible la variación de los ángulos de ataque en cada una de las ruedas conlleva también un consumo de energía no despreciable, lo que obliga a encontrar un equilibrio. En este caso encontrar este equilibrio es complicado, ya que no se cuenta con los datos de consumo eléctrico de cada uno de los motores pero aún así, en general, no resultará práctico variar más de 20 o 30 grados este ángulo de ataque, tanto por el consumo eléctrico como por el tiempo de transición real disponible entre una y otra posición.

Introducción al programa matemático utilizado

Para llevar a cabo toda la resolución del proyecto se ha utilizado un software llamado Matlab. Este nombre proviene de la abreviación de estas dos palabras: "MATrix LABoratory".

Se trata de un software matemático muy potente utilizado en una gran variedad de aplicaciones para ingeniería. En él es fácil trabajar con una gran variedad de elementos como vectores, escalares, matrices o funciones.

Además, en el caso particular de éste proyecto, es muy importante su módulo de programación, en el cual es posible desarrollar un programa en el que nos podemos ayudar de una gran cantidad de funciones ya definidas en el mismo.

En el caso de este proyecto, la versión de Matlab Utilizada será la R2009a con Symbolic Toolbox implementado, que permite poder trabajar en matlab con funciones de forma bastante sencilla.

Hipótesis y simplificaciones

Las principales hipótesis consideradas en el desarrollo del proyecto son:

- El centro de referencia del sistema de coordenadas se coloca en un punto tal que el vehículo siempre se encuentre en el primer cuadrante, lo que simplifica el programa de cálculo.
- Se desprecian los efectos producidos por el desplazamiento entre las ruedas y la superficie de la trayectoria considerando que el coeficiente de rozamiento de una de las mismas es infinito.
- El par que ejerce la rueda delantera es el mismo tanto en valor como en sentido, que el que realiza la rueda trasera.
- En el cálculo del par se considera como sentido positivo el contrario al del sentido de las agujas del reloj, lo que significa que en caso de que el vehículo deba superar una pendiente, el signo del par que el programa da cómo resultado es negativo.

En la Imagen 4 se exponen los criterios de signo del programa:

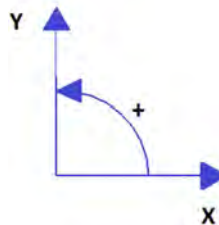


Imagen 4. Criterios de signo

Modelo de Estudio

El modelo con el que se llevará a cabo el desarrollo del proyecto será el que se puede ver en la Imagen 5:

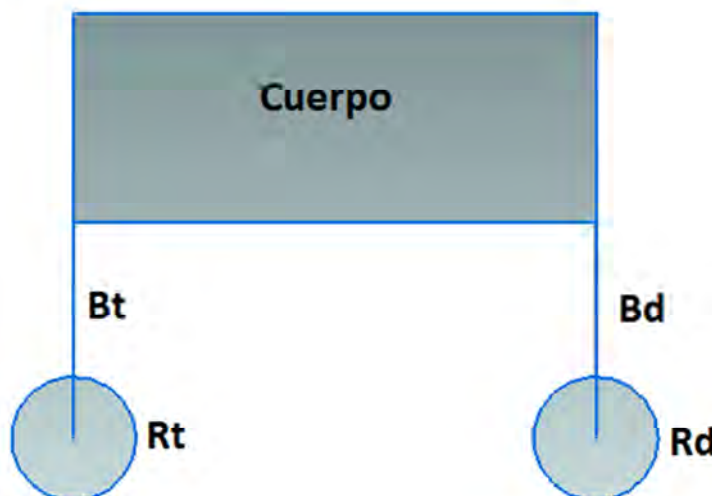


Imagen 5. Esquema básico del UGV

Este modelo es una simplificación en 2 dimensiones del vehículo real, de tal forma sea mucho más fácil su modelización y su simulación.

Este modelo consta de los siguientes elementos:

- Cuerpo del vehículo correspondiente a la mitad del vehículo completo.
- 2 barras o patas que unen las ruedas con el cuerpo del vehículo.
- 2 ruedas correspondientes a una rueda delantera y a una rueda trasera.

Por último, en la Tabla 1 se pueden ver las masas y dimensiones correspondientes a cada uno de los elementos del vehículo:

Variable	Descripción	Valor
L [m]	Longitud del cuerpo del vehículo	0,832 m
l [m]	Longitud de los brazos del vehículo	0,35 m
Rr [m]	Radio de las ruedas del vehículo	0,1 m
mr [Kg]	Masa de las ruedas	50 Kg
mc [Kg]	Masa del cuerpo del vehículo	300 Kg
mb [Kg]	Masa de los brazos del vehículo	20 Kg
H [m]	Altura del cuerpo del vehículo	0,336 m

Tabla 1. Dimensiones y masas del modelo

CAPÍTULO III:

DESARROLLO TEÓRICO

Cinemática

En esta parte del proyecto se lleva a cabo el estudio cinemático del UGV. En ella se obtendrán las posiciones de cada una de las partes del UGV para cada configuración angular y trayectoria, así como los puntos de contacto entre las ruedas y la trayectoria.

Definición del cuadrilátero

Una de las partes más importantes de este apartado es la correcta resolución geométrica del cuadrilátero interno del vehículo. Esto se debe a que la mayoría de resultados que se calculen a partir de este momento, tendrán como base esta definición geométrica haciendo que sus resultados dependan de la misma.

Los datos de partida en la resolución del cuadrilátero son:

- Longitudes de las barras.
- Longitud del cuerpo del vehículo.
- Valor de los ángulos delantero y trasero de las barras con el cuerpo del UGV.

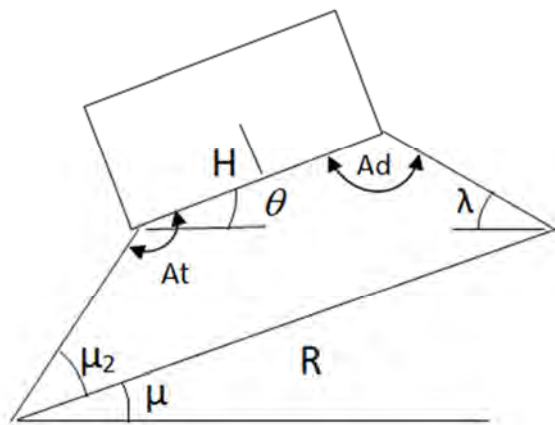


Imagen 6. Parámetros del cuadrilátero interno

A partir de estos datos de partida, y mediante los teorema del seno, coseno y como no, el de Pitágoras se obtienen las siguientes expresiones que permiten definir las dimensiones y ángulos del cuadrilátero que pueden verse en la Imagen 6. A continuación se enumeran los pasos a seguir:

1. Cálculo de la distancia d:

$$d = \sqrt{L^2 + l^2 - 2 \cdot L \cdot l \cdot \cos(At)}$$

2. Cálculo de la distancia R:

$$R^2 = (L - l \cdot \cos(At) - \cos(Ad))^2 + l^2 \cdot (\sin(At) - \sin(Ad))^2$$

3. Finalmente se obtiene la expresión que calcula el valor del ángulo:

$$\mu_2 = \cos^{-1} \left(\frac{(-l \cdot \cos(At)) \cdot (L - l \cdot \cos(Ad) - l \cdot \cos(At)) + (l \cdot \sin(At)) \cdot (l \cdot \sin(Ad) - l \cdot \sin(At))}{l \cdot R} \right)$$

4. A continuación se obtiene el ángulo μ correspondiente a la inclinación del vehículo mediante las coordenadas de los centros de gravedad de la rueda delantera y la rueda trasera:

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{y_{cd} - y_{ct}}{x_{cd} - x_{ct}} \right)$$

5. Por último, ayudándonos de μ se deducen las expresiones de los dos últimos ángulos que faltan por obtener:

$$\lambda = 2 \cdot \pi - Ad - At - \mu - \mu_2 \quad \theta = At + \mu + \mu_2 - \pi$$

Con todos estos cálculos quedarían definidos los parámetros más importantes que definen el cuadrilátero y que son necesarios para poder calcular los centros de masas de cada uno de los elementos del vehículo.

Mediante las siguientes expresiones se calculan las posiciones de los centros de masas de todos los elementos del vehículo:

- **Brazo delantero:**

$$x_{bd} = x_d - \frac{l}{2} \cdot \cos(\lambda)$$

$$y_{bd} = y_d - \frac{l}{2} \cdot \sin(\lambda)$$

- **Brazo trasero:**

$$x_{bt} = x_t - \frac{l}{2} \cdot \cos(\mu + \mu_2)$$

$$y_{bt} = y_t - \frac{l}{2} \cdot \sin(\mu + \mu_2)$$

- **Cuerpo del vehículo:**

$$C_{mx} = x_t + l \cdot \cos(\mu + \mu_2) + \frac{L}{2} \cdot \cos(\theta) - \frac{H}{2} \cdot \sin(\theta)$$

$$C_{my} = y_t + l \cdot \sin(\mu + \mu_2) + \frac{L}{2} \cdot \sin(\theta) + \frac{H}{2} \cdot \cos(\theta)$$

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

El centro de gravedad de la rueda delantera es (x_d, y_d) y el de la rueda trasera (x_t, y_t) y a partir de ellos se lleva el cálculo del resto. Ambos han sido calculados en la parte en la que se calcula la trayectoria de los centros de masas del vehículo.

Dinámica

En esta segunda parte se lleva a cabo el desarrollo dinámico del UGV. Esto significa que en cada uno de los puntos de la trayectoria se lleva a cabo un equilibrio cuasi-estático que permite obtener las fuerzas y el par que gobiernan el movimiento del UGV.

Sistema de ecuaciones

Es necesario plantear un sistema de ecuaciones que consiga resolver este equilibrio cuasi-estático. Debido a que el planteamiento del mismo debe ser válido para cualquier configuración angular y para cualquier función trayectoria, los vectores que lo describen han sido definidos de forma genérica.

El sistema de ecuaciones que se resuelve está formado por tres ecuaciones distintas. En la Imagen 7 es posible ver todas las partes y puntos que conforman este sistema de ecuaciones con los elementos correspondientes a cada una de las tres ecuaciones

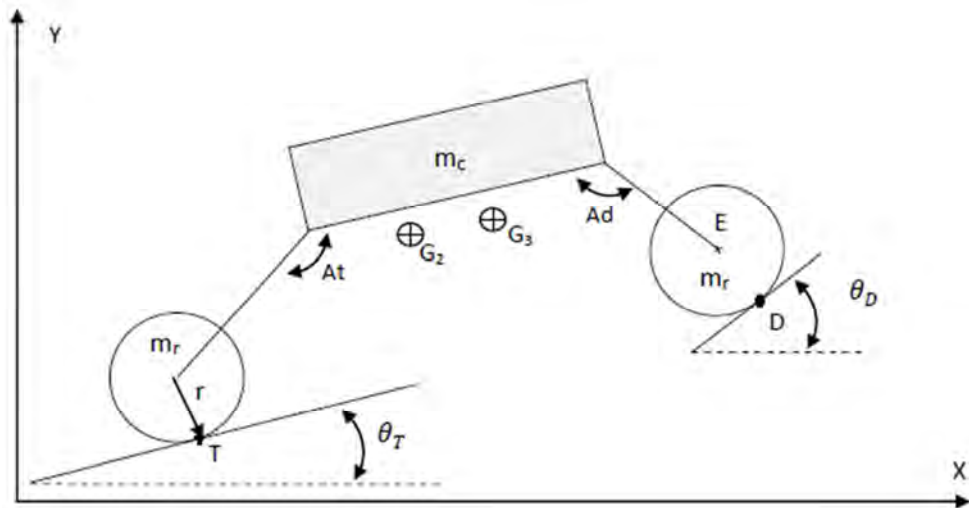


Imagen 7. Definición geométrica del UGV

A continuación se explica qué es cada uno de los elementos que están en la Imagen 7 del UGV:

- A_t : Ángulo que forma la barra trasera con el cuerpo del UGV.
- A_d : Ángulo que forma la barra delantera con el cuerpo del UGV.
- m_c : Masa del cuerpo del UGV [Kg].
- m_r : Masa de las ruedas del UGV [Kg].
- r : Radio de las ruedas [m].
- G_2 : Centro de masas del sistema 2: Rueda trasera, cuerpo y barras.
- G_3 : Centro de masas del sistema completo.
- θ_t : Ángulo de la pendiente del terreno en el punto de contacto de la rueda trasera con el mismo.
- θ_d : Ángulo de la pendiente del terreno en el punto de contacto de la rueda delantera con el mismo.

Estos tres subsistemas darán lugar a las fórmulas que permitirán al programa relacionar los datos de entrada con los de salida:

- Sistema de la rueda trasera.
- Sistema de cuerpo, rueda trasera y patas.
- Sistema completo.

A continuación, cada uno de estos tres subsistemas será resuelto, planteando para cada uno de ellos las ecuaciones del equilibrio tanto para fuerzas en x y en y, como para los momentos.

SISTEMA 1: RUEDA TRASERA:

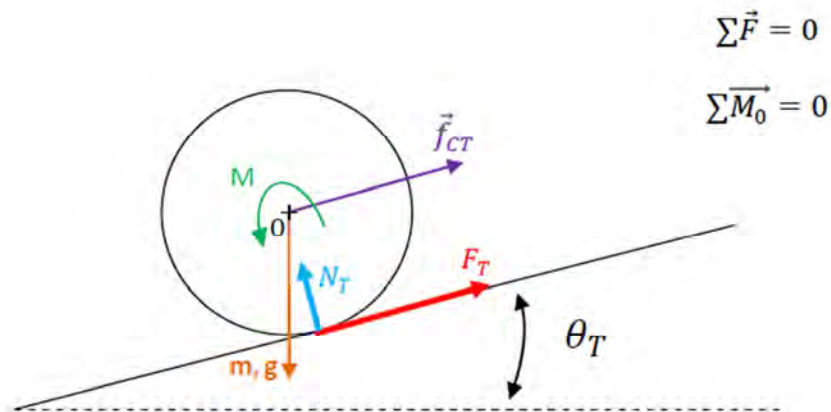


Imagen 8. Definición del sistema 1

Basándose en la Imagen 8 las ecuaciones que en este caso se obtienen son:

- (1) $F_t \cos \theta_t - N_t \sin \theta_t + f_{CT} = 0$
- (2) $F_t \sin \theta_t + N_t \cos \theta_t + f_{CT} = m_r g$
- (3) $F_{tr} + M = 0$

SISTEMA 2: RUEDA TRASERA, CUERPO Y BARRAS:

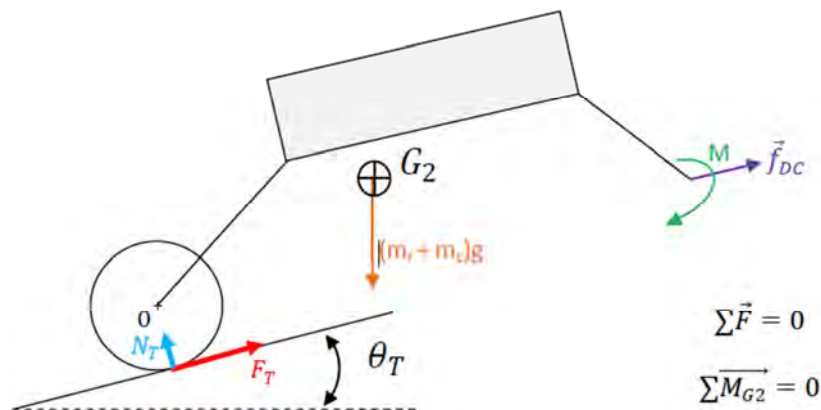


Imagen 9. Definición del sistema 2

Basándose en la Imagen 9 las ecuaciones que en este caso se obtienen son:

$$(4) \quad Ft \cos Bt - Nt \sin Bt + fdc_x = 0$$

$$(5) \quad Ft \sin Bt + Nt \cos Bt + fdc_y = (m_r + m_c)g$$

$$(6) \quad -\overline{G2T_y}(Ft \cos Bt - Nt \sin Bt) + \overline{G2T_x}(Ft \sin Bt + Nt \cos Bt) - \overline{G2E_y}(fdc_x) + \overline{G2E_x}(fdc_y) - M = 0$$

SISTEMA 3: TODO EL VEHÍCULO:

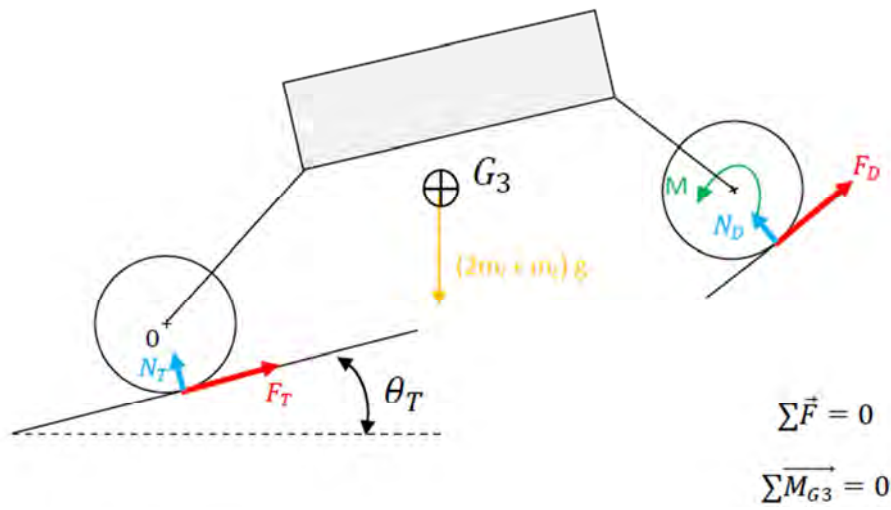


Imagen 10. Definición del sistema 3

Basándose en la Imagen 10 ecuaciones que en este caso se obtienen son:

$$(7) \quad Ft \cos Bt - Nt \sin Bt + Fd \cos Bd - Nd \sin Bd = 0$$

$$(8) \quad Ft \sin Bt + Nt \cos Bt + Fd \sin Bd + Nd \cos Bd = (2m_r + m_c)g$$

$$(9) \quad -\overline{G3T_y}(Ft \cos Bt - Nt \sin Bt) + \overline{G3T_x}(Ft \sin Bt + Nt \cos Bt) - \overline{G3D_y}(Fd \cos Bd - Nd \sin Bd) + \overline{G3D_x}(Fd \sin Bd + Nd \cos Bd) = 0$$

Las incógnitas que se tienen en las ecuaciones son: $Ft, Nt, Fd, Nd, fct_x, fct_y, fdc_x, fdc_y$ y M .

Ahora, por tanto, se irá resolviendo poco a poco el sistema de ecuaciones hasta obtener un sistema simplificado y equivalente de 5 ecuaciones con 5 incógnitas el cual será el que se introduzca y resuelva en Matlab.

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

En primer lugar, es posible observar que $fdc_x = fct_x$ y que $fdc_y = fct_y + m_c g$. Considerando esto, se pueden eliminar las ecuaciones (4) y (5). Quedando el sistema reducido a:

- (1) $Ft \cos Bt - Nt \sin Bt + fct_x = 0$
- (2) $Ft \sin Bt + Nt \cos Bt + fct_y = m_r g$
- (3) $Ft \cos Bt - Nt \sin Bt + Fd \cos Bd - Nd \sin Bd = 0$
- (4) $Ft \sin Bt + Nt \cos Bt + Fd \sin Bd + Nd \cos Bd = (2m_r + m_c)g$
- (5) $Ftr + M = 0$
- (6) $\overrightarrow{G2T_y}(Nt \sin Bt - Ft \cos Bt) + \overrightarrow{G2T_x}(Ft \sin Bt + Nt \cos Bt) - \overrightarrow{G2E_y}(fct_x) + \overrightarrow{G2E_x}(fct_y) - M = -\overrightarrow{G2E_x}(m_c g)$
- (7) $\overrightarrow{G3T_y}(Nt \sin Bt - Ft \cos Bt) + \overrightarrow{G3T_x}(Ft \sin Bt + Nt \cos Bt) + \overrightarrow{G3D_y}(Nd \sin Bd - Fd \cos Bd) + \overrightarrow{G3D_x}(Fd \sin Bd + Nd \cos Bd) = 0$

Si se busca aún más, se ve que combinando las ecuaciones (1) y (3) se obtiene la siguiente ecuación:

$$fct_x = Fd \cos Bd - Nd \sin Bd$$

También es posible combinar las ecuaciones (2) y (4), obteniendo en este caso:

$$fct_y = Fd \sin Bd + Nd \cos Bd - (m_r + m_c)g$$

Con estas dos nuevas simplificaciones, el sistema queda reducido a tan solo 5 ecuaciones las cuales son:

- (1) $Ft \cos Bt - Nt \sin Bt + Fd \cos Bd - Nd \sin Bd = 0$
- (2) $Ft \sin Bt + Nt \cos Bt + Fd \sin Bd + Nd \cos Bd = (2m_r + m_c)g$
- (3) $Ftr + M = 0$
- (4) $\overrightarrow{G2T_y}(Nt \sin Bt - Ft \cos Bt) + \overrightarrow{G2T_x}(Ft \sin Bt + Nt \cos Bt) + \overrightarrow{G2E_y}(Nd \sin Bd - Fd \cos Bd) + \overrightarrow{G2E_x}(Fd \sin Bd + Nd \cos Bd) - M = +\overrightarrow{G2E_x}(m_r g)$
- (5) $\overrightarrow{G3T_y}(Nt \sin Bt - Ft \cos Bt) + \overrightarrow{G3T_x}(Ft \sin Bt + Nt \cos Bt) + \overrightarrow{G3D_y}(Nd \sin Bd - Fd \cos Bd) + \overrightarrow{G3D_x}(Fd \sin Bd + Nd \cos Bd) = 0$

Estas son las 5 ecuaciones con sus 5 incógnitas correspondientes que serán finalmente introducidas en Matlab, y que harán posible calcular el PAR. Las 5 incógnitas que se obtendrán son: Ft, Nt, Fd, Nd y M.

Como se puede comprobar tanto en los dibujos como en las ecuaciones, a la hora de llevar a cabo el cálculo del equilibrio de momentos, se han tenido que utilizar unos vectores cuyos signos por defecto son positivos.

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

También se han calculados los centros de gravedad del sistema 2 y 3, ambos necesarios para resolver el sistema de ecuaciones.

Agrupando y ordenando todas las ecuaciones anteriores y expresándolas en forma de sistema matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \cos Bt & -\sin Bt & \cos Bd & -\sin Bd & 0 \\ \sin Bt & \cos Bt & \sin Bd & \cos Bd & 0 \\ r & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \overrightarrow{G2T_x} \sin Bt - \overrightarrow{G2T_y} \cos Bt & \overrightarrow{G2T_y} \sin Bt + \overrightarrow{G2T_x} \cos Bt & \overrightarrow{G2E_x} \sin Bd - \overrightarrow{G2E_y} \cos Bd & \overrightarrow{G2E_y} \sin Bd + \overrightarrow{G2E_x} \cos Bd & -1 \\ \overrightarrow{G3T_x} \sin Bt - \overrightarrow{G3T_y} \cos Bt & \overrightarrow{G3T_y} \sin Bt + \overrightarrow{G3T_x} \cos Bt & \overrightarrow{G3D_x} \sin Bd - \overrightarrow{G3D_y} \cos Bd & \overrightarrow{G3D_y} \sin Bd + \overrightarrow{G3D_x} \cos Bd & 0 \end{bmatrix}$$

CAPÍTULO IV:

DESARROLLO EN MATLAB

Introducción a Matlab R2009a

En este programa informático se lleva a cabo la implementación del algoritmo de programación que realizará los cálculos necesarios para obtener para cualquier posición de la trayectoria y cualquier configuración angular del vehículo, el Par necesario para que éste pueda moverse. El código completo de programación del algoritmo se puede consultar en el anexo 2 Código de programación del documento. La nomenclatura utilizada es la misma que la que se puede encontrar en el anexo 1 Glosario. A continuación se explican algunas de las funciones de Matlab utilizadas en la programación del algoritmo:

- Comando subs

El comando subs se utiliza básicamente para sustituir una variable por otra. Este comando tiene varias aplicaciones dada la amplitud de su uso. Puede sustituir una variable simbólica por un valor determinado real dentro de una función. También puede convertir variables simbólicas en datos reales.

- Comando polyfit

Dado un conjunto de pares de datos (puntos en el plano), representados en MATLAB mediante dos vectores x e y que almacenan, respectivamente, las coordenadas x e y de dichos datos, puede realizarse un ajuste polinómico de grado n ($n=1$ para una recta, ...) de los mismos.

- Función sort

La función sort es capaz de colocar los elementos de una matriz en base a unos criterios seleccionable, de manera creciente, de manera decreciente, por una columna determina, solo unos determinados valores, etc.

- Función sortrows

La función sortrows es una variante de la función sort que es capaz de colocar filas completas dentro de una matriz únicamente por orden creciente pudiendo elegir por qué columna se necesita ordenar.

- Comando xlswrite/xlsread

El comando xlswrite exporta la variable seleccionada a un libro de Excel con la posibilidad de elegir la cuadrícula exacta. El comando xlsread es el inverso.

- Comando plot

El comando plot sirve para graficar dentro de Matlab. Tiene múltiples variables y una gran personalización.

Cinemática

En primer lugar, para definir de forma geométrica las distintas posiciones de todos los elementos del vehículo, y su posición relativa respecto a la trayectoria que debe seguir el mismo, se debe disponer de unos datos básicos de los cuales dependerán los resultados del programa. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se recogen los datos:

Variable	Descripción	Valor
L [m]	Longitud del cuerpo del vehículo	0,832 m
l [m]	Longitud de los brazos del vehículo	0,35 m
Rr [m]	Radio de las ruedas del vehículo	0,1 m
mr [Kg]	Masa de las ruedas	50 Kg
mc [Kg]	Masa del cuerpo del vehículo	300 Kg
mb [Kg]	Masa de los brazos del vehículo	20 Kg
H [m]	Altura del cuerpo del vehículo	0,336 m

Tabla 2. Dimensiones y masas del UGV

Estos datos están basados en el UGV real para el que se ha llevado a cabo este proyecto.

Una vez recogidos estos datos, se debe llevar a cabo un procedimiento matemático con varios pasos descritos a continuación:

1. Establecer la función del terreno:

El usuario, dentro de los argumentos de la función, debe indicar qué función del terreno va a necesitar que sea utilizada ("fpol"), entre qué dos puntos de la misma quiere obtener los resultados ("xmin" y "xmax") y el número de divisiones en las que quiere dividir el rango de orientación del que disponen los brazos (DivD, Divt). Además el usuario ha de proporcionar también una constante "XK" cuya finalidad se explica en el paso 2 y de la cual depende el intervalo de discretización. Es importante destacar que el programa es capaz de trabajar con cualquier tipo de función.

2. Discretización de la función de la trayectoria:

El siguiente paso consiste en discretizar la función proporcionada por el usuario. Para ello en primer lugar se calcula una constante de discretización cuyo valor depende de las dimensiones del vehículo y de la constante "XK" definida en los argumentos de la función.

$$a = \frac{L + l + l + Rc + Rc}{XK}$$

Para continuar con la discretización, es necesario considerar una cierta cantidad de puntos antes del intervalo que nos haya proporcionado el usuario. Esto es necesario porque al empezar consideraremos que el punto de contacto de la rueda delantera del vehículo con la trayectoria se encuentra en el punto llamado "xmin" proporcionado por el usuario. Esto hace necesario discretizar una cierta cantidad de puntos antes de "xmin" ya que a la hora de calcular la posición de la rueda trasera a partir de la posición rueda

delantera, ésta deberá encontrarse en un punto anterior a “xmin”. La longitud que se discretizará antes del punto “xmin” será:

$$L + 2 \cdot l + 2 \cdot Rc + a$$

$$\text{Dónde } a = \frac{L + l + l + Rc + Rc}{XK}$$

Luego el punto en el que finalmente empezará nuestra discretización será en:

$$a0 = x_{\min} - (L + 2 \cdot l + 2 \cdot Rc + a) = x_{\min} - a \cdot (XK + 1)$$

Considerando el valor de “a” arriba definido, esta expresión de “a0” nos garantizará que hasta en el peor de los casos, en el que el UGV tenga la máxima longitud posible, es decir, con sus patas delanteras y traseras formando un ángulo de 180° con el cuerpo, la posición de la rueda trasera se encontraría dentro de nuestro intervalo de puntos discretizados. Además, para mayor seguridad, se ha añadido un 1 en la expresión de cálculo de “a0” que hace que el valor de “a0” disminuya un poco más, eliminando los errores que se pudiesen producir por esta razón.

Es por esto que la discretización se ha dividido en dos partes distintas; un vector que irá desde “a0” a “xmin” de “a” en “a”, y un segundo vector que irá de “xmin” a “xmax” de “a” en “a” también.

Finalmente el programa juntará estos dos vectores, dando lugar a un vector que contenga todos los puntos discretizados en x de nuestro recorrido. A este vector lo llamaremos “x”.

Ahora por último es necesario utilizar la función “subs” de Matlab para obtener un vector de valores “y” en el que se guarden todos los valores de evaluar el vector “x” con la función proporcionada por el usuario “fpol”.

Una vez hecho esto los datos de la función discretizada se guardan en dos vectores “x” e “y” de la misma longitud. En estos vectores por ejemplo, la posición 50 de cada uno de ellos correspondería con la coordenada x e y del mismo punto discretizado, que en este caso sería el número 50.

3. Obtención de la pendiente en cada uno de los puntos discretizados:

El siguiente paso consiste en obtener para cada uno de los puntos discretizados de la trayectoria su pendiente.

Una forma sencilla, rápida y también bastante precisa de hacerlo es mediante una regresión lineal simple. Matlab dispone de distintas funciones mediante las cuales se pueden llevar regresiones de todo tipo. La función “polyfit” permite al usuario calcular la regresión lineal que más se ajuste a una nube de puntos, obteniendo la pendiente y el término independiente del mismo. Lo único que necesita esta función, es que el usuario proporcione dos vectores de la misma longitud, con las coordenadas en x e y de los puntos correspondientes. Si se le suma una densidad de puntos lo suficientemente buena, podemos obtener unos resultados bastante precisos.

A continuación se explica la forma en que el programa calcula la pendiente de un punto:

1. Selección del punto para el cual se quiere calcular la pendiente llamado "i".
2. Se crea un vector "X" con los puntos del vector "x" correspondientes al punto anterior a dicho punto "i", "i-1", y al punto siguiente, "i+1".
3. Se crea otro vector "Y" con los mismos puntos que el vector en x, "i-1", "i" "i+1", pero correspondientes al vector "y".
4. Con los vectores "X" e "Y", y con la ayuda de la función "polyfit" de Matlab, se calcula la pendiente de la regresión lineal que mejor se adapta a estos tres puntos.
5. Por último mediante el arcotangente es posible obtener el ángulo correspondiente a esta pendiente y almacenarlo en un nuevo vector "ang" de la misma longitud que los vectores "x" e "y" anteriormente definidos.

Cabe destacar que en el caso particular del primer y último punto de la discretización, la regresión lineal solo se llevará a cabo con dos puntos, el punto en el que estamos llevando el cálculo y el de al lado.

4. Cálculo de la trayectoria de los centros de gravedad de las ruedas.

En este apartado se llevará a cabo el cálculo de la trayectoria discretizada para los centros de gravedad de las ruedas del vehículo.

Como en los apartados anteriores, se calcula un punto de la trayectoria de los centros de masas para cada uno de los puntos de la trayectoria discretizada.

Para ello son necesarios los vectores "x","y" y "ang" además de utilizar también el radio de la rueda.

El resultado de este apartado serán dos vectores, "x1m" y "fx1m" que se corresponden a las coordenadas x e y respectivamente de la trayectoria de los centros de gravedad de las ruedas. Al igual que en los apartados anteriores, para una posición "i" correspondiente a un punto cualquiera de la trayectoria discretizada, hay un valor de cada uno de los vectores "x","y","ang","x1m" y "fx1m", lo que permite trabajar de manera muy fácil con todos estos datos y vectores.

El cálculo de la trayectoria de los centros de gravedad de las ruedas en cada punto depende del signo de la pendiente en cada uno de los mismos. De tal forma que atendiendo a esto, se puede calcular como:

- Con pendiente positiva:

$$\begin{aligned}x1m &= x - Rc \cdot \text{sen}(ang) \\fx1m &= x + Rc \cdot \cos(ang)\end{aligned}$$

- Con pendiente negativa:

$$\begin{aligned}x1m &= x + Rc \cdot \text{sen}(ang) \\fx1m &= x + Rc \cdot \cos(ang)\end{aligned}$$

A continuación con la Imagen 11 se puede comprender bien el procedimiento de cálculo:

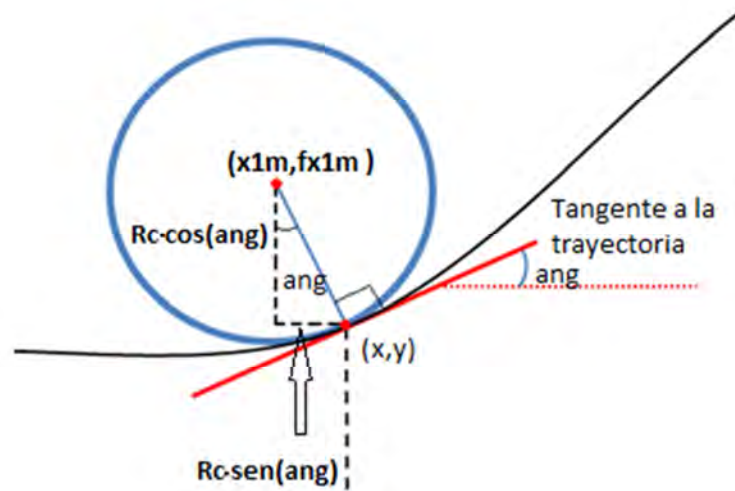


Imagen 11. Punto de contacto de la rueda y la trayectoria

5. Cálculo de la distancia entre los centros de gravedad de la rueda delantera y trasera y definición del cuadrilátero que ésta completa.

En este paso se obtiene una expresión la cual da como resultado la distancia que hay entre los dos centros de gravedad de las ruedas delantera y trasera. Esta expresión es:

$$R^2 = (L - l \cdot \cos(at) - l \cdot \cos(ad))^2 + l^2 \cdot (\sin(at) - \sin(ad))^2$$

Esta distancia D se puede ver en la Imagen 12.

Además, por otro lado se llevará a cabo también la resolución del cuadrilátero que forman el cuerpo, las patas y la distancia que une los centros de gravedad de ambas ruedas. La resolución detallada del mismo se lleva a cabo en el capítulo III del proyecto, en la parte que habla de la cinemática del UGV.

Los parámetros que se obtienen a la hora de resolver este cuadrilátero se muestran en la Imagen 12:

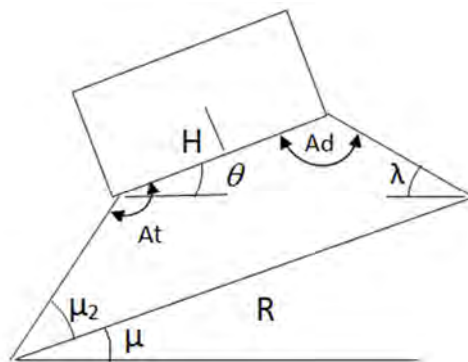


Imagen 12. Parámetros del cuadrilátero interno

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Estos parámetros serán necesarios para la resolución de los siguientes apartados. A partir de ahora el parámetro llamado R es llamado D ya que en la nomenclatura del programa se llama así.

A modo de comprobación a continuación, se exponen 6 ejemplos de configuración angular los cuales sirven para comprobar que los resultados obtenidos en estos apartados son correctos. Para cada una de ellas se mostrará una imagen en Solid Works del cuadrilátero formado para dicha configuración.

En la Tabla 3 se encuentran las dimensiones del vehículo con las que se han llevado a cabo las comprobaciones:

Variable	Descripción	Medida
L [m]	Longitud del cuerpo del vehículo	0,8
l [m]	Longitud de los brazos del vehículo	0,3
Rr [m]	Radio de las ruedas del vehículo	0,1

Tabla 3. Dimensiones vehículo para comprobación del cuadrilátero

Los dibujos acotados permiten comprobar que los resultados obtenidos en Matlab mediante el programa son correctos. A continuación en la Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6, se recogen los resultados del programa del ángulo C, el ángulo μ_2 y la distancia D entre centros de masas de las ruedas. Además, en cada una de ellas se encuentran señaladas con distintos colores cada una de las configuraciones angulares que se han representado en Solid Works:

Ad/At	At=0	At=20	At=40	At=60	At=80	At=100	At=120	At=140	At=160	At=180
Ad=0	180,0	134,8	104,5	83,4	66,6	51,8	38,2	25,2	12,5	0,0
Ad=20	154,8	160,0	122,6	96,9	77,5	61,3	46,8	33,1	20,0	7,1
Ad=40	144,5	177,4	140,0	110,9	88,8	70,6	54,7	40,0	26,0	12,5
Ad=60	143,4	176,9	149,1	120,0	96,6	77,1	60,0	44,4	29,6	15,3
Ad=80	146,6	177,5	151,2	123,4	100,0	80,0	62,3	46,0	30,6	15,7
Ad=100	151,8	178,7	149,4	122,9	100,0	80,0	62,0	45,4	29,7	14,4
Ad=120	158,2	173,2	145,3	120,0	97,7	78,0	60,0	43,2	27,3	11,7
Ad=140	165,2	166,9	140,0	115,6	94,0	74,6	56,8	40,0	23,9	8,3
Ad=160	172,5	160,0	134,0	110,4	89,4	70,3	52,7	36,1	20,0	4,2
Ad=180	180,0	152,9	127,5	104,7	84,3	65,6	48,3	31,7	15,8	0,0

Tabla 4. Valores de μ_2

Ad/At	At=0	At=20	At=40	At=60	At=80	At=100	At=120	At=140	At=160	At=180
Ad=0	180,0	205,2	215,5	216,6	213,4	208,2	201,8	194,8	187,5	180,0
Ad=20	185,2	160,0	177,4	183,1	182,5	178,7	173,2	166,9	160,0	152,9
Ad=40	175,5	122,6	140,0	149,1	151,2	149,4	145,3	140,0	134,0	127,5
Ad=60	156,6	103,1	110,9	120,0	123,4	122,9	120,0	115,6	110,4	104,7
Ad=80	133,4	82,5	88,8	96,6	100,0	100,0	97,7	94,0	89,4	84,3
Ad=100	108,2	61,3	70,6	77,1	80,0	80,0	78,0	74,6	70,3	65,6
Ad=120	81,8	46,8	54,7	60,0	62,3	62,0	60,0	56,8	52,7	48,3
Ad=140	54,8	33,1	40,0	44,4	46,0	45,4	43,2	40,0	36,1	31,7
Ad=160	27,5	20,0	26,0	29,6	30,6	29,7	27,3	23,9	20,0	15,8
Ad=180	0,0	7,1	12,5	15,3	15,7	14,4	11,7	8,3	4,2	0,0

Tabla 5. Valores del ángulo C

Ad/At	At=0	At=20	At=40	At=60	At=80	At=100	At=120	At=140	At=160	At=180
Ad=0	0,200	0,241	0,332	0,436	0,537	0,626	0,700	0,755	0,789	0,800
Ad=20	0,241	0,236	0,302	0,400	0,504	0,602	0,686	0,753	0,800	0,825
Ad=40	0,332	0,302	0,340	0,425	0,528	0,631	0,723	0,800	0,857	0,891
Ad=60	0,436	0,400	0,425	0,500	0,599	0,703	0,800	0,882	0,945	0,985
Ad=80	0,537	0,504	0,528	0,599	0,696	0,800	0,899	0,983	1,048	1,089
Ad=100	0,626	0,602	0,631	0,703	0,800	0,904	1,003	1,087	1,150	1,189
Ad=120	0,700	0,686	0,723	0,800	0,899	1,003	1,100	1,182	1,242	1,277
Ad=140	0,755	0,753	0,800	0,882	0,983	1,087	1,182	1,260	1,315	1,344
Ad=160	0,789	0,800	0,857	0,945	1,048	1,150	1,242	1,315	1,364	1,386
Ad=180	0,800	0,825	0,891	0,985	1,089	1,189	1,277	1,344	1,386	1,400

Tabla 6. Valor de D. Distancia entre los cdg de la ruedas

Ahora se exponen los 6 dibujos en Solid Works correspondientes a cada una de las 6 configuraciones angulares. Las configuraciones angulares se han elegido intentando comprobar o demostrar que el modelo de resolución del cuadrilátero funciona bien para cualquier configuración angular.

1. At=40° y Ad=80°

A esta configuración angular le corresponden las celdas marcadas en color verde. En la Imagen 13 se puede ver que los resultados obtenidos son correctos.

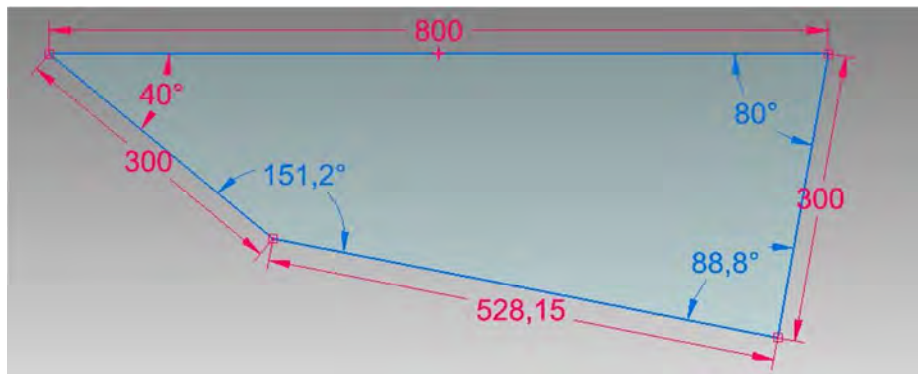


Imagen 13. Configuración angular para At=40 y Ad=80

Comprobando con los resultados obtenidos del programa, se puede ver que en este caso los resultados son muy precisos.

2. At=80° y Ad=140°

A esta configuración angular le corresponde el color de celda granate. En este caso como se puede ver en la Imagen 14 los resultados obtenidos son también muy precisos y se pueden dar por válidos.

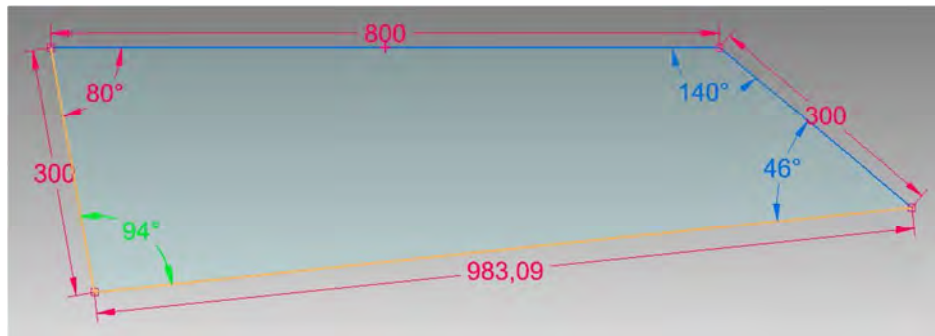


Imagen 14. Configuración angular para $A_t=80$ y $A_d=140$

3. $A_t=20^\circ$ y $A_d=160^\circ$

A continuación se puede ver la Imagen 15 en la que se puede comprobar que los valores obtenidos siguen siendo muy precisos también. Esta imagen, como dato curioso, tiene la peculiaridad de que D tiene exactamente el mismo valor que L es decir, 0.8 m. El color de celda correspondiente a esta configuración angular es el Rojo.



Imagen 15. Configuración angular para $A_t=20$ y $A_d=160$

4. $A_t=180^\circ$ y $A_d=0^\circ$

Este caso se trata de un caso extremo, en el que el cuadrilátero por expresarlo de alguna forma, se convierte en una línea. Observando los casos anteriores, se pueden predecir los valores de los otros ángulos del cuadrilátero para esta configuración angular. El color de celda correspondiente es el Naranja, y como se puede ver en la Imagen 16 los resultados son también correctos.



Imagen 16. Configuración angular para $A_t=180$ y $A_d=0$

5. $A_t=160^\circ$ y $A_d=120^\circ$

Este es otra configuración angular la cual se puede ver en la Imagen 17. Los resultados siguen siendo muy precisos pudiéndose considerar correctos. En este caso el color de celda correspondiente es gris.

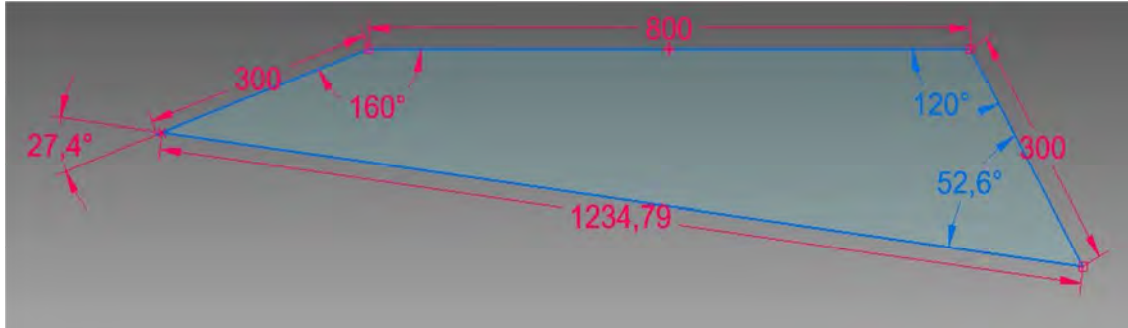


Imagen 17. Configuración angular para $A_t=160$ y $A_d=120$

6. $A_t=40^\circ$ y $A_d=160^\circ$

Esta es la última configuración angular que se va a comprobar. El color de celda que le corresponde es el azul. Como se puede ver en la Imagen 18 los resultados son muy precisos y también se pueden dar como correctos.

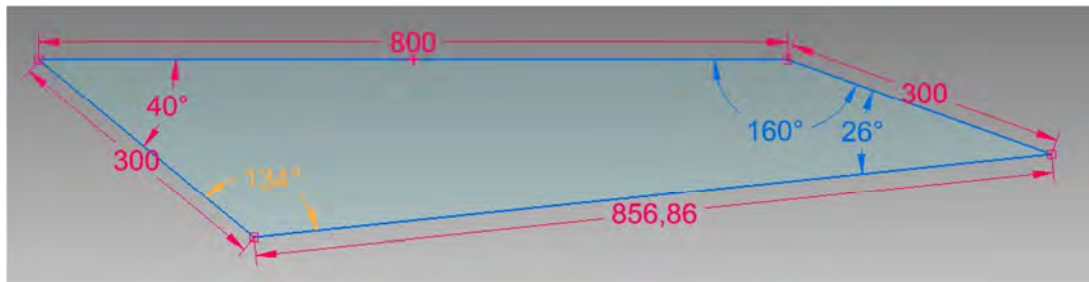


Imagen 18. Configuración angular para $A_t=40$ y $A_d=160$

Como conclusión de todos los ejemplos se puede decir que el modelo de resolución del cuadrilátero interno del vehículo es válido, pudiendo utilizar sus resultados para la resolución de las siguientes fases del proyecto.

6. Obtención de la posición del centro de gravedad de la rueda trasera para cada posición de la rueda delantera y toda configuración angular.

Esta parte es una de las más complicadas del proyecto. En ella, utilizando los datos calculados hasta el momento, hay que llevar a cabo la obtención del centro de gravedad de la rueda trasera para todas las configuraciones angulares y para cada uno de los puntos de la trayectoria en los que se puede encontrar la rueda delantera.

Para entenderlo mejor, se debe suponer que inicialmente la rueda delantera del vehículo se encuentra en el punto "i" de la trayectoria. Esto, si se recuerda lo anteriormente explicado, significa que las coordenadas del punto de contacto de la misma en la trayectoria son:

$$(x(i), y(i))$$

Además, por otro lado, las coordenadas del centro de gravedad de la rueda delantera serían:

$(x1m(i), fx1m(i))$

Por otro lado, se supone que el vehículo tiene una determinada configuración angular, lo que define también la distancia que hay entre los dos centros de gravedad, tal y como se ha explicado en el apartado anterior, por lo que también se cuenta con el valor D.

Una vez considerado esto, se ejecutará un algoritmo iterativo que el programa seguirá a la hora de obtener el centro de gravedad de la rueda trasera el cual cuenta con los siguientes pasos:

1. El programa accede a los datos de las coordenadas del centro de gravedad del punto inmediatamente anterior al correspondiente a la rueda delantera "i". En el caso de la primera iteración, se calcula un nuevo punto denominado "v", cuyo valor es "v=i-1". Este punto como se puede imaginar, se encuentra más cerca de la rueda trasera que el anterior. En las iteraciones siguientes, se debe reutilizar la variable "v", utilizando las expresiones "v=i-n" o "v=v-1" donde en el caso de la primera expresión, "n" corresponde al número de iteraciones realizadas en este paso del algoritmo. De esta forma, nos iremos acercando poco a poco al punto de intersección que buscamos. La Imagen 19 explica un poco lo que ocurre con los puntos:

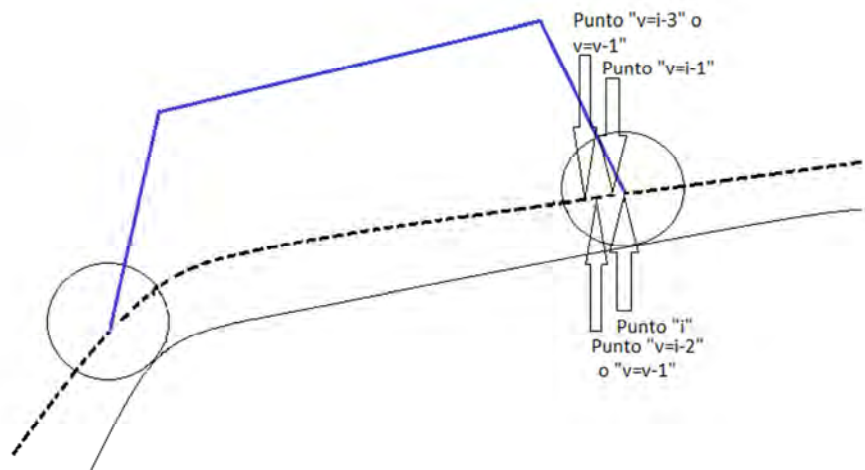


Imagen 19. Cálculo cdg rueda trasera: puntos cercanos al cdg de la rueda delantera

2. A continuación, mediante el Teorema de Pitágoras, el programa calcula la distancia que hay entre el punto "i" y el punto "v", mediante la fórmula:

$$d(v) = \sqrt{(x1m(i) - x1m(v))^2 + (fx1m(i) - fx1m(v))^2}$$

En la fórmula se puede ver como cada valor de "d" corresponde a un cierto valor de "v".

Esto hace que se almacenen las distancias "d" correspondientes a cada uno de los puntos "v".

A continuación, la Imagen 20 explica de forma clara el cálculo:

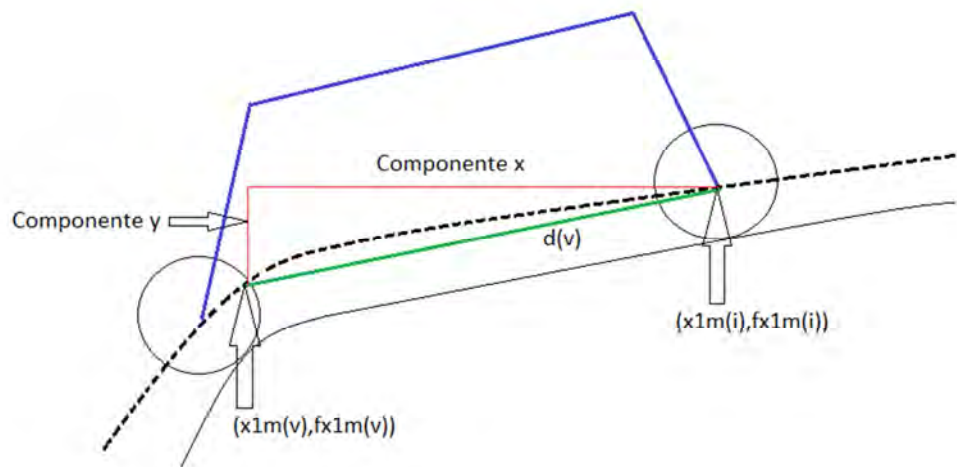


Imagen 20. Cálculo de las distancia d

Existen dos opciones de continuar con el algoritmo cuyo criterio de selección depende de las siguientes dos condiciones:

a) $d < D(a,b)$

Esto significa que aún no se ha llegado al centro de gravedad de la rueda trasera, por lo que se vuelve a empezar de nuevo por el punto 1, realizando una nueva iteración en el mismo. A esta situación corresponde la Imagen 21, ya que el punto de cálculo de " $d(v)$ " se encuentra antes de la intersección.

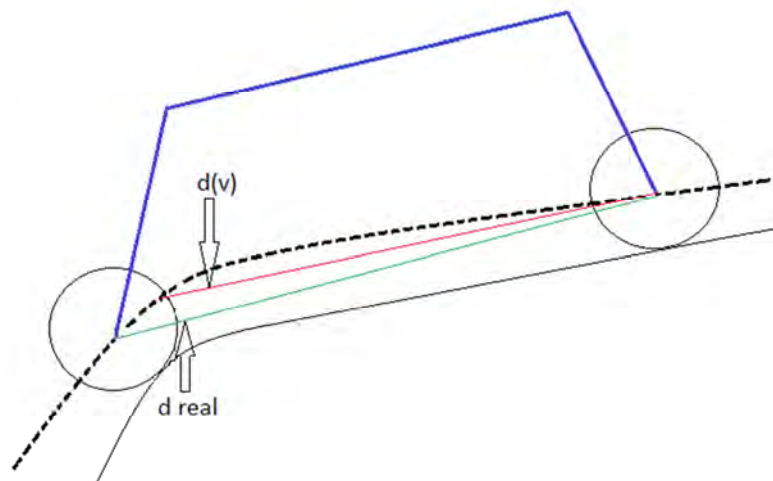


Imagen 21. Cálculo cdg rueda trasera. $d < D(a,b)$

b) $d > D(a,b)$

Esto significa que el programa se ha “pasado” el punto en el que se encuentra el centro de gravedad de la rueda trasera. En este caso la ejecución del algoritmo continúa en el punto 3. A esta situación correspondería la Imagen 22 en la que “ $d(v)$ ” se encuentra después del punto de intersección.

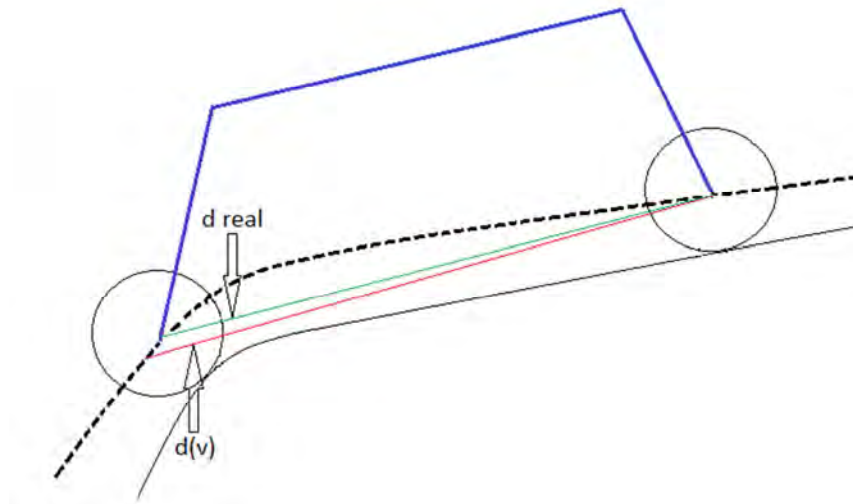


Imagen 22. Cálculo cdg rueda trasera: $d > D(a,b)$

- Una vez el programa se ha “pasado” la intersección entre el cdg de la rueda trasera y la trayectoria del mismo, hay dos posibles centros de gravedad, por lo que se debe escoger el más preciso. Estos puntos son: el punto actual en el que el algoritmo está, cuyo valor actual del mismo es “ v ”, y el anterior, cuyo valor es “ $v+1$ ”. Esto es así porque tal y como se ha visto en los dibujos, el valor del punto correspondiente de la trayectoria va disminuyendo a medida que el algoritmo se va repitiendo. En la Imagen 23 se puede entender mejor esto:

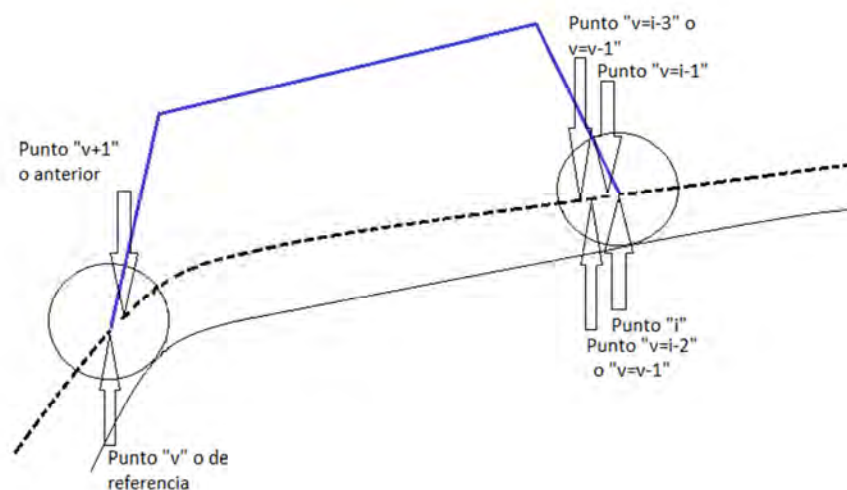


Imagen 23. Cálculo cdg rueda trasera: Distribución de los puntos

Finalmente, para elegir el punto de los dos que más cerca esté del valor real, el programa diferenciará entre estas dos posibles situaciones y se quedará con la que minimice el error producido:

a) $|d(v) - D(a, b)| < |d(v+1) - D(a, b)|$

En este caso, que se puede ver en la Imagen 24 el punto que minimiza el error es el correspondiente a v , por lo que el centro de gravedad de la rueda trasera quedará determinado por las coordenadas:

- $x = x_{1m}(v)$
- $y = f_{x1m}(v)$

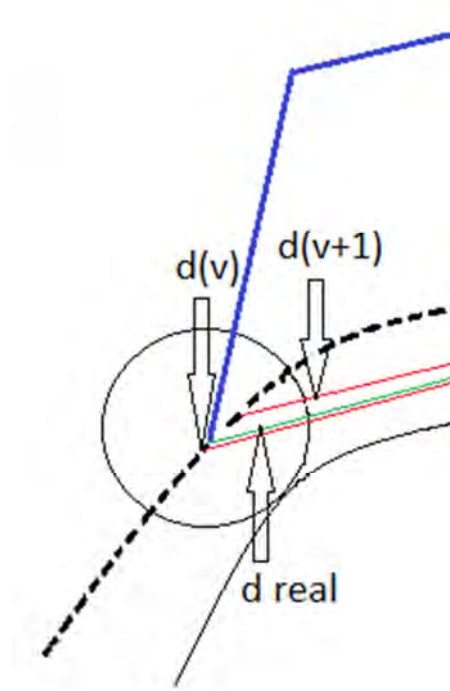


Imagen 24. Cálculo cdg rueda trasera: $d = d(v)$

b) $|d(v+1) - D(a, b)| \leq |d(v) - D(a, b)|$

En este caso, tal y como se ve en la Imagen 25 el punto que minimiza el error es el correspondiente a " $v+1$ ", y por lo tanto, las coordenadas de los centros de gravedad quedarán definidos por:

- $x = x_{1m}(v+1)$
- $y = f_{x1m}(v+1)$

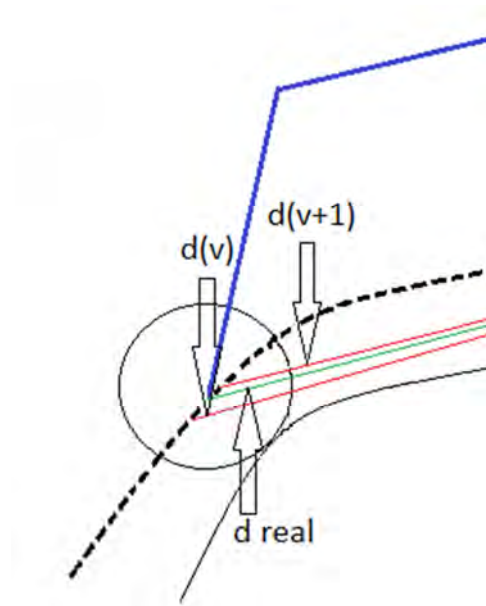


Imagen 25. Cálculo cdg rueda trasera: $d=d(v+1)$

Solo decir que a pesar de no ser un método de cálculo totalmente preciso, esta depende en gran medida de la constante "XK" definida en los argumentos de entrada de la función, de tal forma que si se escoge un valor alto de la misma, los errores puede considerarse despreciables.

Siguiendo lo anteriormente explicado, en el caso del dibujo anterior, el punto escogido sería el v, es decir, el punto en que el programa se encuentra a la hora de escoger el punto.

Todo esto lleva a que el resultado de este apartado sea un número natural el cual defina la posición de la rueda trasera para cada uno de los vectores que se han definido a lo largo de todos los apartados.

Por poner un ejemplo cualquiera, supóngase que se parte de estos datos:

- $i=258$
- $Ad = 90^\circ$
- $At = 150^\circ$

Y como resultado de este último apartado se obtiene que la posición en la que la rueda trasera se encuentra, dado este punto " $i=258$ " y esta configuración angular es " $v=103$ ", los resultados que podrían obtenerse fácilmente son:

VARIABLE	Rueda delantera	Rueda trasera
<i>Punto de contacto con la superficie</i>	$(x(258),y(258))$	$(x(103),y(103))$
<i>Centro de masas de la rueda</i>	$(x1m(258),fx1m(258))$	$(x1m(103),fx1m(103))$
<i>Pendiente de la trayectoria</i>	$ang(258)$	$ang(103)$

Tabla 7. Ejemplo de cálculo del cdg de la rueda trasera

Mediante la Tabla 7 es más fácil entender qué resultados calcula el programa.

La conclusión que se puede obtener es que todos los vectores son idénticos tanto para la rueda delantera como para la trasera. Esto se debe a que parámetros como el centro de masas de la rueda, el punto de contacto con la trayectoria o la pendiente de la trayectoria en un punto determinado solo dependen de la posición de la rueda y no de que la misma sea la delantera o la trasera del vehículo.

Además contando con una posición dada de la trayectoria, automáticamente es posible obtener los siguientes datos:

- Punto de contacto de la rueda con la trayectoria
- Centro de masas de la rueda
- Pendiente de la trayectoria para ese punto.

Por lo que resulta mucho más sencillo almacenar un simple número que represente la posición de la rueda trasera para una determinada posición delantera y una determinada configuración angular.

Por ello, a la hora de almacenar los datos se ha decidido emplear una matriz de tres dimensiones. Esta matriz consta de dos dimensiones de tamaño constantes, las cuales corresponden a las posibles configuraciones angulares del brazo delantero y trasero del vehículo respectivamente, y una tercera dimensión variable, dependiente del número total de puntos que tenga la trayectoria sobre la que se esté trabajando. Esta matriz de 3 dimensiones será llamada "Result(Ad,At,i)" donde:

- Ad: sirve para elegir la orientación de la pata delantera.
- At: sirve para elegir la orientación de la pata trasera.
- i: sirve para seleccionar el punto que se quiera de la trayectoria.

Dinámica

En esta segunda parte del proyecto se llevará a cabo la resolución de la parte dinámica del mismo.

Al igual que en la primera parte, se parte de una situación en la que nuestro vehículo se encuentra en uno de los puntos de la trayectoria, y en la que su configuración angular está determinada.

En primer lugar, es necesario disponer de los resultados que la primera parte del programa nos proporciona.

A continuación se explica la metodología a seguir a la hora de desarrollar esta segunda parte del proyecto:

1. Identificación las posiciones de los elementos del vehículo que necesitamos:

El primer punto es muy importante, y consiste en almacenar los puntos de contacto con el suelo y los centros de gravedad de las ruedas delanteras y traseras. El punto "i" será el correspondiente a la rueda delantera y la posición "PT" será la correspondiente a la rueda trasera de tal forma que los datos necesarios para empezar son:

- $(x_d, y_d) = (x(i), y(i))$ que corresponde al punto de contacto de la rueda delantera con el suelo.
- $(x_{cd}, y_{cd}) = (x_{1m}(i), f_{x1m}(i))$ que corresponde al centro de gravedad de la rueda delantera.
- $(x_t, y_t) = (x(PT), y(PT))$ que corresponde al punto de contacto de la rueda trasera con el suelo.
- $(x_{ct}, y_{ct}) = (x_{1m}(PT), f_{x1m}(PT))$ que corresponde al centro de gravedad de la rueda trasera.

2. Cálculo de los centros de gravedad de los elementos que necesitamos:

Ahora en segundo lugar debemos llevar a cabo el cálculo de los centros de gravedad de cada uno de los elementos del vehículo.

3. Cálculo del centro de gravedad del vehículo y los subsistemas:

Para llevar a cabo la resolución total esta segunda parte del proyecto, se debe de plantear un sistema relativamente completo el cual está explicado en la parte más matemática del proyecto.

El sistema se encuentra dividido en varios subsistemas cuyos centros de gravedad deben ser calculados para la correcta resolución del proyecto. El centro de gravedad del primer subsistema corresponde con el de la rueda delantera, por lo que no será necesario calcularlo. El centro de gravedad del segundo sin embargo, si es necesario calcularlo, y se llamará G2. Respecto al tercer subsistema su centro de masas corresponde al vehículo completo, y se llamará G3.

Con esto, ya se dispone de todos los datos necesarios para poder llevar a cabo la resolución completa del sistema.

4. Resolución del sistema completo y obtención del PAR:

Una vez se dispone de todos los datos necesarios, se debe resolver mediante Matlab todo el sistema matemático que hemos obtenido al plantear las ecuaciones. Estas ecuaciones se encuentran planteadas y resueltas en el apartado 4.3.1.

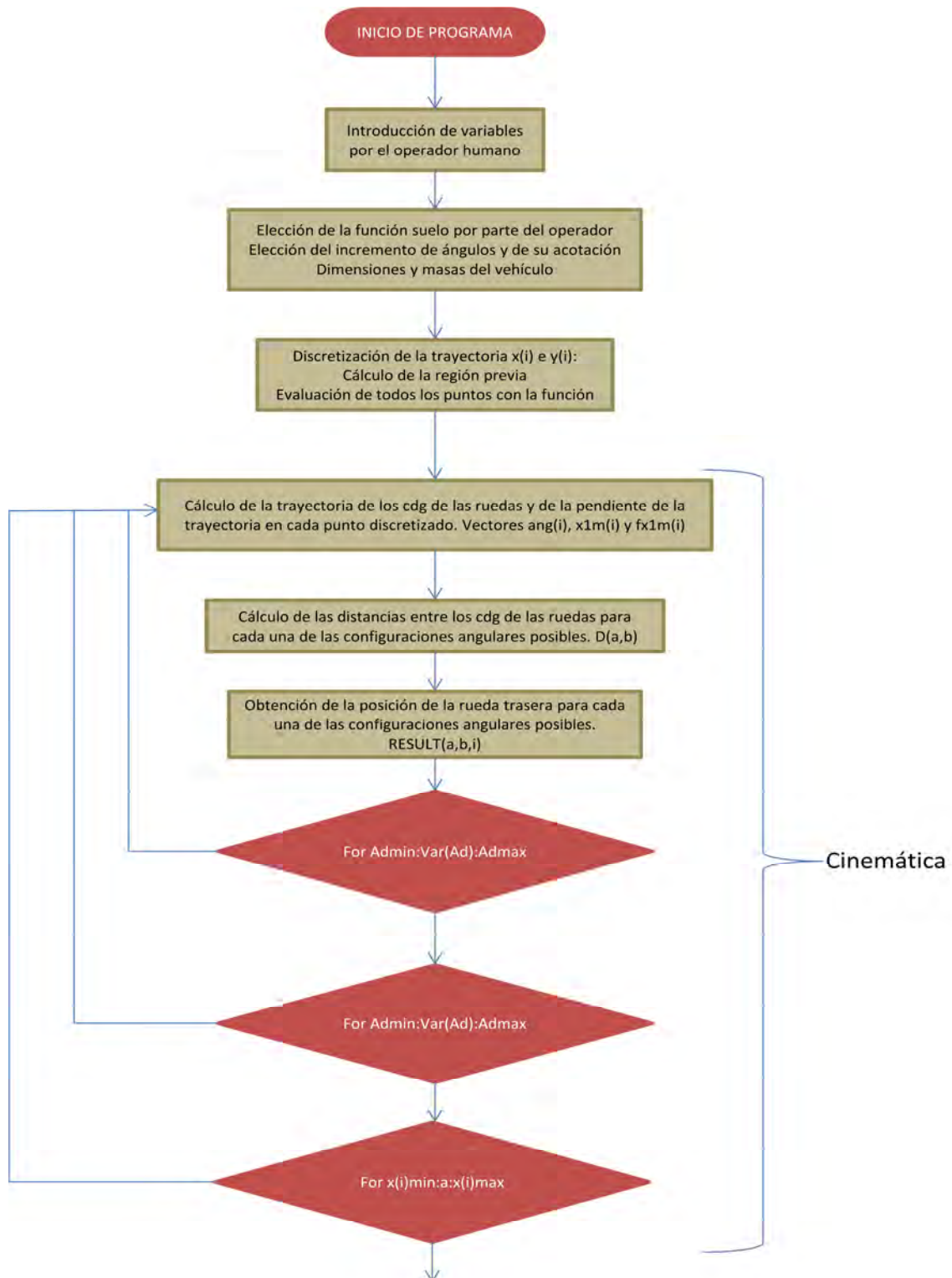
Como resultado de este apartado el par será calculado y almacenado en una matriz de tres dimensiones, tal y como fue almacenada en la primera parte del proyecto la posición de la rueda trasera. También se pueden almacenar otros datos relacionados con el modelo como las fuerzas normales en cada una de las ruedas, y las fuerzas tangenciales en cada una de las ruedas también. La forma de almacenarlas sería exactamente igual que el PAR, en una matriz de 3 dimensiones.

En último lugar se lleva a cabo el cálculo y la obtención de distintos caminos en función de ciertos criterios que el vehículo puede llevar a lo largo de la trayectoria. Estos caminos son:

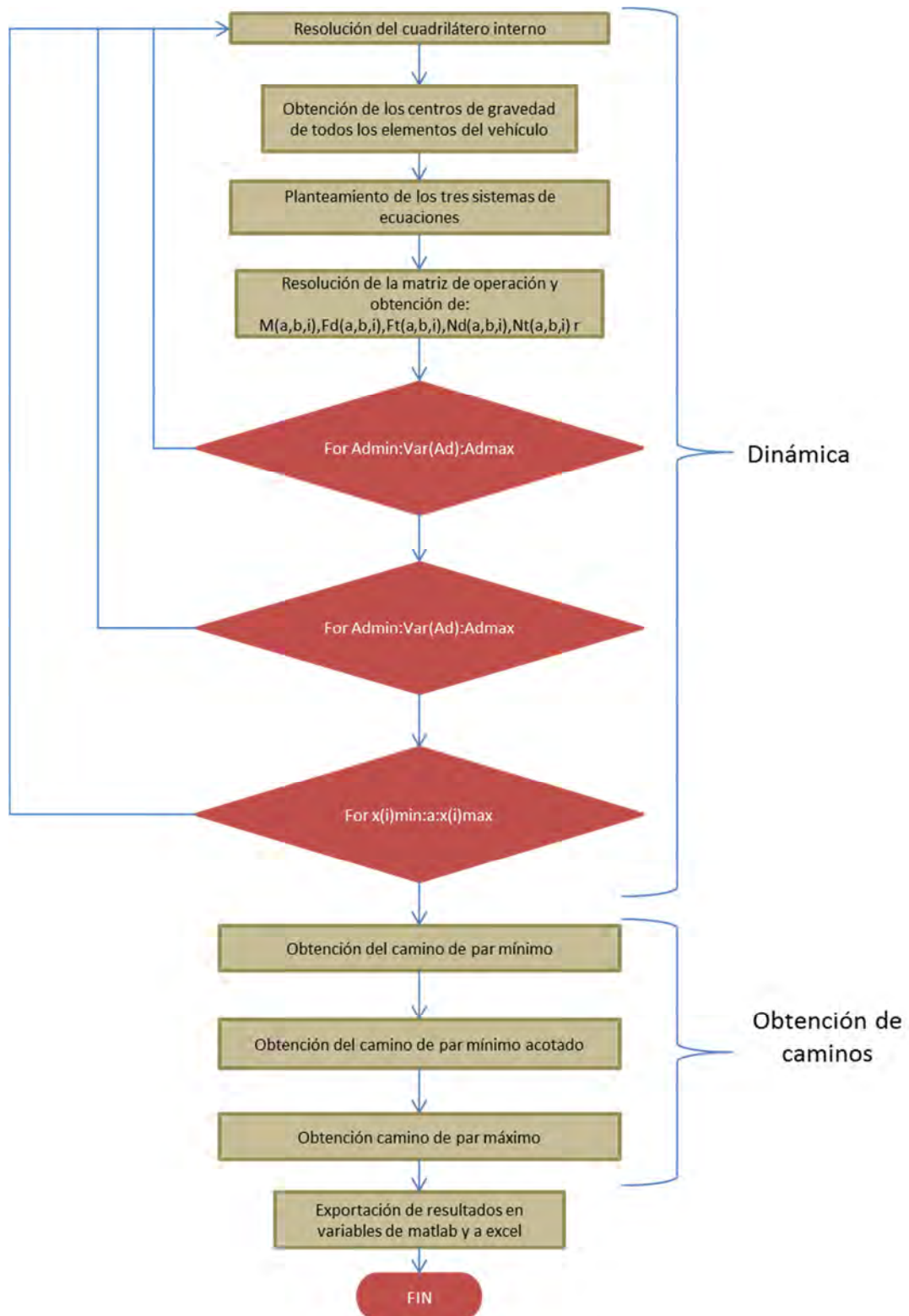
- Camino de mínimo par: Indica las configuraciones angulares que el UGV debe tomar a lo largo de la trayectoria y en cada punto de la misma para que el Par requerido en la misma sea el mínimo posible.
- Camino de mínimo par acotado: Indica las configuraciones angulares que el UGV debe tomar a lo largo de la trayectoria y en cada punto de la misma para que el par requerido en la misma sea el mínimo posible considerando un ángulo de acotación que limita la máxima variación que las barras del UGV pueden llevar a cabo.
- Camino de par máximo: Indica las configuraciones angulares que el UGV debe tomar a lo largo de la trayectoria y en cada punto de la misma para que el par requerido en la misma sea el máximo posible.

Diagrama de flujo

Mediante un diagrama de flujo se explica paso a paso y de forma simplificada el funcionamiento del algoritmo desarrollado en este proyecto.



Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando



CAPÍTULO V:

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

En este apartado se recogen los resultados obtenidos del algoritmo así como el análisis de los mismos en lo relativo a la mejora en la reducción del par necesario.

Esto solo se llevará a cabo para cuatro funciones distintas que son bastantes representativas y permiten sacar conclusiones globales sobre el comportamiento del algoritmo ante cualquier tipo de trayectoria. Estas cuatro funciones son:

- Función Recta: $f_1 = A \cdot x$
- Función parábola: $f_2 = (A \cdot (x - B)^2) + C$
- Función montaña: $f_3 = (A \cdot e^{-(x-B)^2}) + C$
- Función seno: $f_4 = (0,10 \cdot \sin(x \cdot B)) + C$

Estos parámetros nos permiten controlar lo siguiente:

- A toma distintos valores que cambian la forma de cada función y que se especifican en la Tabla 8.
- B=4 permite mantener las funciones en valores positivos del eje x consiguiendo que la función siempre se encuentre en el primer cuadrante. En el caso de la función seno en la que sirve para reducir el periodo y multiplicar el número de ondas.
- C=2 permite mantener las funciones en valores positivos de y, garantizando que la función se encuentra en el primer cuadrante.

A continuación en la Tabla 8 se muestran los valores que A tomará para cada una de las funciones suelo definidas antes:

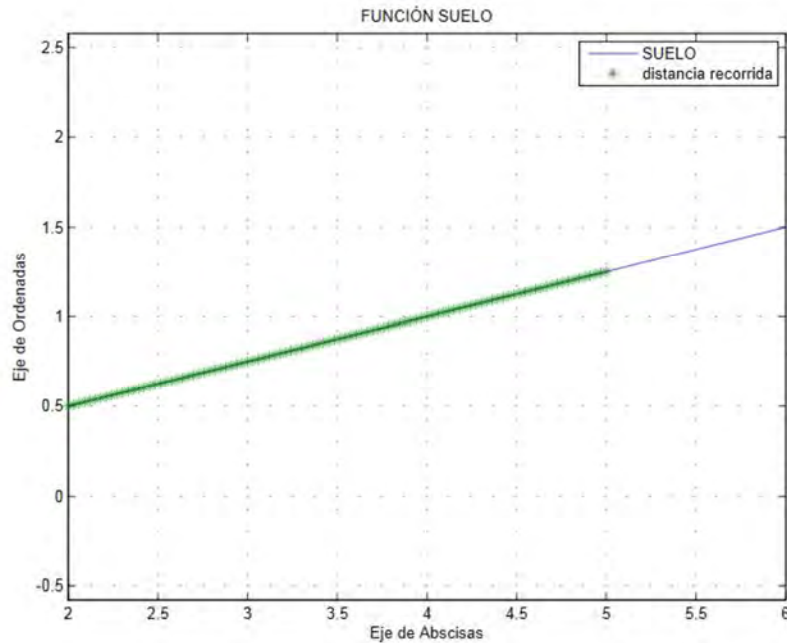
Función suelo	Valor A		
Recta	0,25	0,50	0,75
Parábola	0,10	0,15	0,20
Montaña	0,10	0,15	0,20

Tabla 8. Valores de la constante A

Función Recta

En primer lugar llevamos a cabo la recapitulación y estudio de los resultados para la función recta con parámetro $A=0,25$

En la Gráfica 1 se puede observar la trayectoria del vehículo, y en la Tabla 9 los resultados obtenidos del mismo.



Gráfica 1. Representación función suelo. Recta $f=0,25 \cdot x$

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	14,04	14,04	0	0	-52,3	3791,4	396,1	523,4	523,4
2	14,04	14,04	0	60	-52,3	2787,2	1400,3	523,4	523,4
2	14,04	14,04	0	120	-52,3	3337,2	850,3	523,4	523,4
2	14,04	14,04	0	180	-52,3	3645,1	542,4	523,4	523,4
2	14,04	14,04	60	0	-52,3	623,9	3563,6	523,4	523,4
2	14,04	14,04	60	60	-52,3	3038,6	1149,0	523,4	523,4
2	14,04	14,04	60	120	-52,3	3281,1	906,4	523,4	523,4
2	14,04	14,04	60	180	-52,3	2933,3	1254,3	523,4	523,4
2	14,04	14,04	120	0	-52,3	868,0	3319,5	523,4	523,4
2	14,04	14,04	120	60	-52,3	1997,2	2190,4	523,4	523,4
2	14,04	14,04	120	120	-52,3	2475,8	1711,8	523,4	523,4
2	14,04	14,04	120	180	-52,3	2385,8	1801,7	523,4	523,4
2	14,04	14,04	180	0	-52,3	1077,2	3110,3	523,4	523,4
2	14,04	14,04	180	60	-52,3	1994,9	2192,7	523,4	523,4
2	14,04	14,04	180	120	-52,3	2307,0	1880,5	523,4	523,4
2	14,04	14,04	180	180	-52,3	2243,2	1944,3	523,4	523,4
3	14,04	14,04	0	0	-52,3	3791,4	396,1	523,4	523,4
3	14,04	14,04	0	60	-52,3	2787,2	1400,3	523,4	523,4
3	14,04	14,04	0	120	-52,3	3337,2	850,3	523,4	523,4
3	14,04	14,04	0	180	-52,3	3645,1	542,4	523,4	523,4

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

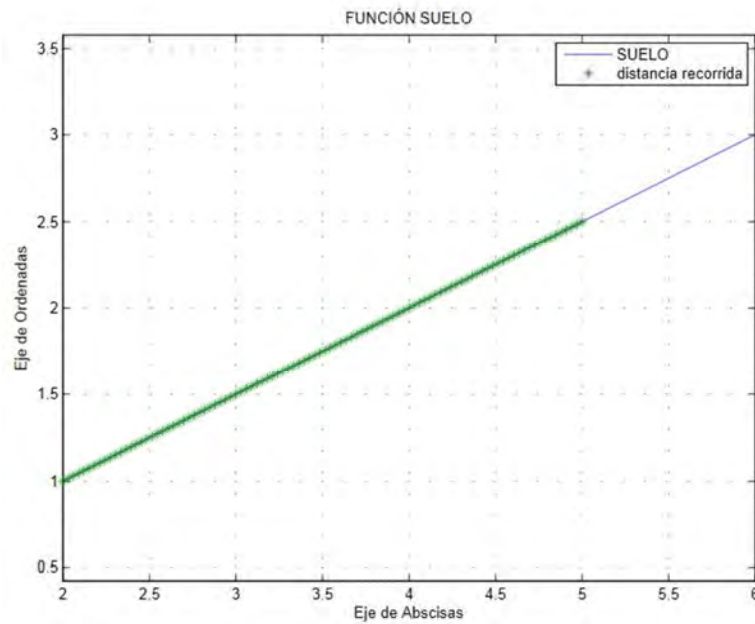
3	14,04	14,04	60	0	-52,3	623,9	3563,6	523,4	523,4
3	14,04	14,04	60	60	-52,3	3038,6	1149,0	523,4	523,4
3	14,04	14,04	60	120	-52,3	3281,1	906,4	523,4	523,4
3	14,04	14,04	60	180	-52,3	2933,3	1254,3	523,4	523,4
3	14,04	14,04	120	0	-52,3	868,0	3319,5	523,4	523,4
3	14,04	14,04	120	60	-52,3	1997,2	2190,4	523,4	523,4
3	14,04	14,04	120	120	-52,3	2475,8	1711,8	523,4	523,4
3	14,04	14,04	120	180	-52,3	2385,8	1801,7	523,4	523,4
3	14,04	14,04	180	0	-52,3	1077,2	3110,3	523,4	523,4
3	14,04	14,04	180	60	-52,3	1994,9	2192,7	523,4	523,4
3	14,04	14,04	180	120	-52,3	2307,0	1880,5	523,4	523,4
3	14,04	14,04	180	180	-52,3	2243,2	1944,3	523,4	523,4
4	14,04	14,04	0	0	-52,3	3791,4	396,1	523,4	523,4
4	14,04	14,04	0	60	-52,3	2787,2	1400,3	523,4	523,4
4	14,04	14,04	0	120	-52,3	3337,2	850,3	523,4	523,4
4	14,04	14,04	0	180	-52,3	3645,1	542,4	523,4	523,4
4	14,04	14,04	60	0	-52,3	623,9	3563,6	523,4	523,4
4	14,04	14,04	60	60	-52,3	3038,6	1149,0	523,4	523,4
4	14,04	14,04	60	120	-52,3	3281,1	906,4	523,4	523,4
4	14,04	14,04	60	180	-52,3	2933,3	1254,3	523,4	523,4
4	14,04	14,04	120	0	-52,3	868,0	3319,5	523,4	523,4
4	14,04	14,04	120	60	-52,3	1997,2	2190,4	523,4	523,4
4	14,04	14,04	120	120	-52,3	2475,8	1711,8	523,4	523,4
4	14,04	14,04	120	180	-52,3	2385,8	1801,7	523,4	523,4
4	14,04	14,04	180	0	-52,3	1077,2	3110,3	523,4	523,4
4	14,04	14,04	180	60	-52,3	1994,9	2192,7	523,4	523,4
4	14,04	14,04	180	120	-52,3	2307,0	1880,5	523,4	523,4
4	14,04	14,04	180	180	-52,3	2243,2	1944,3	523,4	523,4

Tabla 9. Resultados función suelo recta $f=0.25 \cdot x$

La función recta es la función suelo más sencilla de las cuatro que vamos a utilizar. Al tratarse de una recta, la pendiente a lo largo de la misma es la misma. Esto se debe a que con independencia de la configuración angular adoptada, la necesidad de par es idéntica siempre para las ruedas. Además, debido a lo mismo, el par tampoco depende de la configuración angular del vehículo por lo que en este caso carece de sentido llevar a cabo una optimización de los ángulos de ataque ya que en cualquiera de los casos el par necesario para que el vehículo se mueva va a ser el mismo.

Por otro lado se puede ver como las fuerzas normales, si varían en función de la rueda y dependen, exclusivamente, de la configuración angular de las dos barras del vehículo, repitiéndose los mismos valores para la misma configuración angular, independientemente de la posición del vehículo en la trayectoria.

Para confirmar estas hipótesis se lleva a cabo la obtención de resultados de la misma función recta para un valor de $A=0,5$. En la Gráfica 2 se puede observar la trayectoria del vehículo y en la Tabla 10 se pueden ver los resultados de la misma.



Gráfica 2. Representación función suelo. Recta $f= 0,5 \cdot x$

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	26,565	26,57	0	0	-96,52	5020,135	1159,43	965,18	965,18
2	26,565	26,57	0	60	-96,52	2930,042	930,664	965,18	965,18
2	26,565	26,57	0	120	-96,52	3338,523	522,182	965,18	965,18
2	26,565	26,57	0	180	-96,52	3608,997	251,709	965,18	965,18
2	26,565	26,57	60	0	-96,52	1096,308	2764,4	965,18	965,18
2	26,565	26,57	60	60	-96,52	3670,574	190,132	965,18	965,18
2	26,565	26,57	60	120	-96,52	3529,937	330,768	965,18	965,18
2	26,565	26,57	60	180	-96,52	3043,984	816,721	965,18	965,18
2	26,565	26,57	120	0	-96,52	1108,627	2752,08	965,18	965,18
2	26,565	26,57	120	60	-96,52	2349,724	1510,98	965,18	965,18
2	26,565	26,57	120	120	-96,52	2640,345	1220,36	965,18	965,18
2	26,565	26,57	120	180	-96,52	2431,6	1429,11	965,18	965,18
2	26,565	26,57	180	0	-96,52	1248,569	2612,14	965,18	965,18
2	26,565	26,57	180	60	-96,52	2180,48	1680,23	965,18	965,18
2	26,565	26,57	180	120	-96,52	2359,008	1501,7	965,18	965,18
2	26,565	26,57	180	180	-96,52	2199,169	1661,54	965,18	965,18
3	26,565	26,57	0	0	-96,52	5020,135	1159,43	965,18	965,18
3	26,565	26,57	0	60	-96,52	2930,042	930,664	965,18	965,18
3	26,565	26,57	0	120	-96,52	3338,523	522,182	965,18	965,18
3	26,565	26,57	0	180	-96,52	3608,997	251,709	965,18	965,18
3	26,565	26,57	60	0	-96,52	1096,308	2764,4	965,18	965,18
3	26,565	26,57	60	60	-96,52	3670,574	190,132	965,18	965,18
3	26,565	26,57	60	120	-96,52	3529,937	330,768	965,18	965,18
3	26,565	26,57	60	180	-96,52	3043,984	816,721	965,18	965,18
3	26,565	26,57	120	0	-96,52	1108,627	2752,08	965,18	965,18
3	26,565	26,57	120	60	-96,52	2349,724	1510,98	965,18	965,18
3	26,565	26,57	120	120	-96,52	2640,345	1220,36	965,18	965,18
3	26,565	26,57	120	180	-96,52	2431,6	1429,11	965,18	965,18

Algoritmo para optimizar los ángulosde ataque de un UGV en función del terreno discretizando

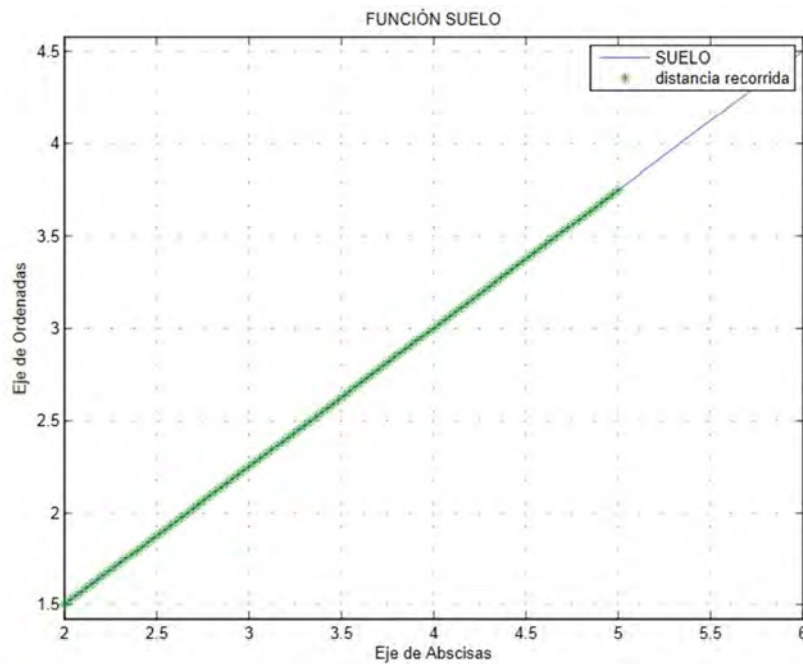
3	26,565	26,57	180	0	-96,52	1248,569	2612,14	965,18	965,18
3	26,565	26,57	180	60	-96,52	2180,48	1680,23	965,18	965,18
3	26,565	26,57	180	120	-96,52	2359,008	1501,7	965,18	965,18
3	26,565	26,57	180	180	-96,52	2199,169	1661,54	965,18	965,18
4	26,565	26,57	0	0	-96,52	5020,135	1159,43	965,18	965,18
4	26,565	26,57	0	60	-96,52	2930,042	930,664	965,18	965,18
4	26,565	26,57	0	120	-96,52	3338,523	522,182	965,18	965,18
4	26,565	26,57	0	180	-96,52	3608,997	251,709	965,18	965,18
4	26,565	26,57	60	0	-96,52	1096,308	2764,4	965,18	965,18
4	26,565	26,57	60	60	-96,52	3670,574	190,132	965,18	965,18
4	26,565	26,57	60	120	-96,52	3529,937	330,768	965,18	965,18
4	26,565	26,57	60	180	-96,52	3043,984	816,721	965,18	965,18
4	26,565	26,57	120	0	-96,52	1108,627	2752,08	965,18	965,18
4	26,565	26,57	120	60	-96,52	2349,724	1510,98	965,18	965,18
4	26,565	26,57	120	120	-96,52	2640,345	1220,36	965,18	965,18
4	26,565	26,57	120	180	-96,52	2431,6	1429,11	965,18	965,18
4	26,565	26,57	180	0	-96,52	1248,569	2612,14	965,18	965,18
4	26,565	26,57	180	60	-96,52	2180,48	1680,23	965,18	965,18
4	26,565	26,57	180	120	-96,52	2359,008	1501,7	965,18	965,18
4	26,565	26,57	180	180	-96,52	2199,169	1661,54	965,18	965,18

Tabla 10. Resultados función suelo recta $f=0.5 \cdot x$

Con los resultados de la función recta con $A=0,5$ es posible ver como las características de los resultados descritas antes se repiten, de tal forma que se caracterizan por lo mismo.

Además, como era de esperar, el par requerido en este segundo caso es mayor que el requerido en el anterior. Esto es así porque la pendiente que el vehículo debe superar es mayor, luego el par ha de crecer acorde con ello. Esto en las tablas de resultados se puede verificar en las pendientes que tienen las trayectorias, que con $A=0,25$ es de $14,04^\circ$ y en el caso de $A=0,5$ es de $26,57^\circ$.

Por último se expondrán los resultados obtenidos con $A=0,75$. En primer lugar la Gráfica 3 muestra la trayectoria del vehículo y en segundo lugar está la Tabla 11 que recoge los resultados de esta función recta.



Gráfica 3. Representación función suelo. Recta $f= 0,75 \cdot x$

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	36,87	36,87	0	0	-129,5	5984,961	2531,84	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	0	60	-129,5	2933,138	519,982	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	0	120	-129,5	3219,952	233,168	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	0	180	-129,5	3449,855	3,2648	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	60	0	-129,5	1397,703	2055,42	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	60	60	-129,5	4051,596	598,476	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	60	120	-129,5	3607,527	154,407	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	60	180	-129,5	3026,107	427,013	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	120	0	-129,5	1256,008	2197,11	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	120	60	-129,5	2552,999	900,121	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	120	120	-129,5	2679,254	773,866	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	120	180	-129,5	2377,965	1075,15	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	180	0	-129,5	1340,798	2112,32	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	180	60	-129,5	2249,843	1203,28	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	180	120	-129,5	2312,632	1140,49	1294,9	1294,9
2	36,87	36,87	180	180	-129,5	2091,977	1361,14	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	0	0	-129,5	5984,961	2531,84	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	0	60	-129,5	2933,138	519,982	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	0	120	-129,5	3219,952	233,168	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	0	180	-129,5	3449,855	3,2648	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	60	0	-129,5	1397,703	2055,42	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	60	60	-129,5	4051,596	598,476	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	60	120	-129,5	3607,527	154,407	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	60	180	-129,5	3026,107	427,013	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	120	0	-129,5	1256,008	2197,11	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	120	60	-129,5	2552,999	900,121	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	120	120	-129,5	2679,254	773,866	1294,9	1294,9

3	36,87	36,87	120	180	-129,5	2377,965	1075,15	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	180	0	-129,5	1340,798	2112,32	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	180	60	-129,5	2249,843	1203,28	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	180	120	-129,5	2312,632	1140,49	1294,9	1294,9
3	36,87	36,87	180	180	-129,5	2091,977	1361,14	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	0	0	-129,5	5984,961	2531,84	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	0	60	-129,5	2933,138	519,982	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	0	120	-129,5	3219,952	233,168	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	0	180	-129,5	3449,855	3,2648	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	60	0	-129,5	1397,703	2055,42	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	60	60	-129,5	4051,596	598,476	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	60	120	-129,5	3607,527	154,407	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	60	180	-129,5	3026,107	427,013	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	120	0	-129,5	1256,008	2197,11	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	120	60	-129,5	2552,999	900,121	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	120	120	-129,5	2679,254	773,866	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	120	180	-129,5	2377,965	1075,15	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	180	0	-129,5	1340,798	2112,32	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	180	60	-129,5	2249,843	1203,28	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	180	120	-129,5	2312,632	1140,49	1294,9	1294,9
4	36,87	36,87	180	180	-129,5	2091,977	1361,14	1294,9	1294,9

Tabla 11. Resultados función suelo recta $f=0.75 \cdot x$

Como era de esperar, los resultados de la Tabla 11 los mismos patrones de forma que los de las tablas X e Y lo que nos permite confirmar las hipótesis que anteriormente planteamos.

Además, analizando un poco más los datos obtenidos, es importante destacar que N_d y N_t son directamente proporcionales al seno de la pendiente. Esto se demuestra con valores correspondiente al caso de $A=0,25$ y $A=0,75$:

$$\frac{\sin(Pdte_{A=0,75})}{\sin(Pdte_{A=0,25})} = \frac{\sin(52,3^\circ)}{\sin(14,04^\circ)} = \frac{Nd_{A=0,75}}{Nd_{A=0,25}} = \frac{Nt_{A=0,75}}{Nt_{A=0,25}} = \frac{1294N}{523N} = 2,47$$

Esto se debe a que el cálculo del par está relacionado con la resistencia al avance del vehículo, que en este caso se debe exclusivamente a la componente del peso que es tangente a la trayectoria, en este caso paralela a la misma, y que depende del seno del ángulo de la pendiente.

Por esta razón, se puede llegar a la conclusión de que el valor del par también es directamente proporcional a este seno, ya que este se relaciona con N_d y N_t mediante el radio de las ruedas como se ve en las ecuaciones. Esto se cumple debido a que el valor del radio permanece invariante cuando la pendiente de la trayectoria varía. En las siguientes dos fórmulas es posible ver estos resultados:

$$M = N_d \cdot r = N_t \cdot r = 1294 N \cdot 0,1m = 129,4 N \cdot m$$

$$\frac{M_{A=0,75}}{M_{A=0,25}} = \frac{129,4N \cdot m}{52,3N \cdot m} = 2,47$$

Función parábola

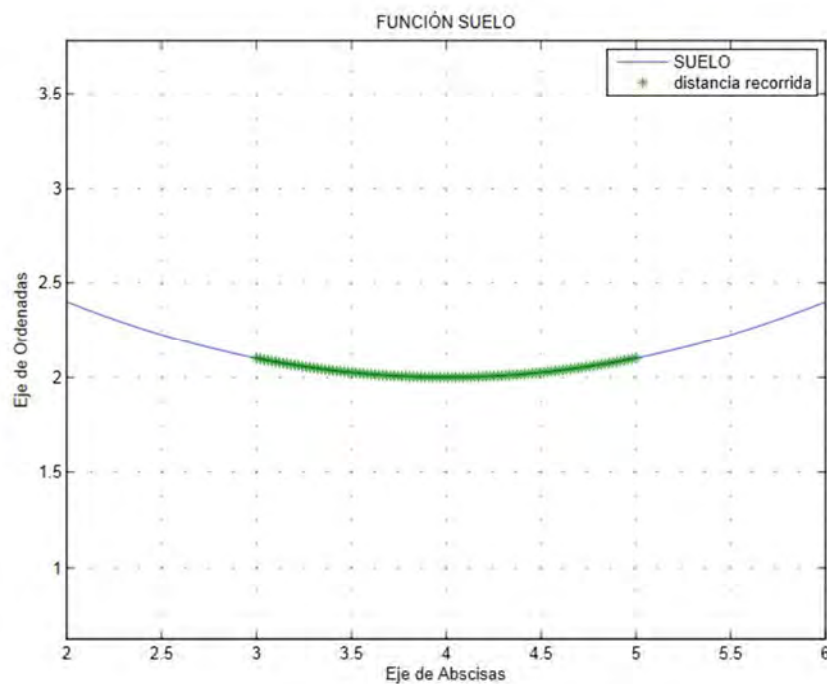
En este apartado se va a llevar a cabo el estudio de los resultados que se obtienen al introducir en el programa una función suelo de tipo parábola.

Se van a realizar tres pruebas distintas, cada una de ellas correspondientes a un valor distinto del parámetro A, cuyo valor se encuentra recogido en la Tabla 8.

Sustituyendo los valores de las constantes que se recogen en las primeras líneas de este capítulo del proyecto, la expresión de la función que se va a utilizar queda de la forma:

$$f=(A\cdot(x-4)^2)+2$$

Como se puede ver en la Gráfica 4 al principio, debido a que la pendiente de la gráfica es negativa, el par en las ruedas del vehículo es positivo, tratando de “frenar” al vehículo para que este avance a una velocidad constante. En la segunda parte del recorrido, la trayectoria cambia su pendiente a positiva y el par en las ruedas adquiere signo negativo lo que significa que los motores deben de “empujar” el vehículo.



Gráfica 4. Representación función suelo. Parábola $f= (0,10* ((x-4)^2))+2$



Gráfica 5. Parábola 0,10 mínimo par

Al contrario de lo que pasa en las funciones tipo recta, tal y como se puede observar en la Gráfica 5 en este caso el par y la fuerza ejercida por las ruedas varían tanto a lo largo de la trayectoria como para cada una de las configuraciones angulares posibles. Desde los 3 metros a los 4, la pendiente de la trayectoria va disminuyendo progresivamente, haciéndolo con ella el par. Una vez alcanzados los 4 metros la trayectoria presenta una pendiente que el vehículo, gracias a la capacidad de orientar sus brazos, consigue evitar hasta alcanzados los 4,8 metros, momento en el cual el valor absoluto del par empieza a aumentar como consecuencia de esta pendiente.



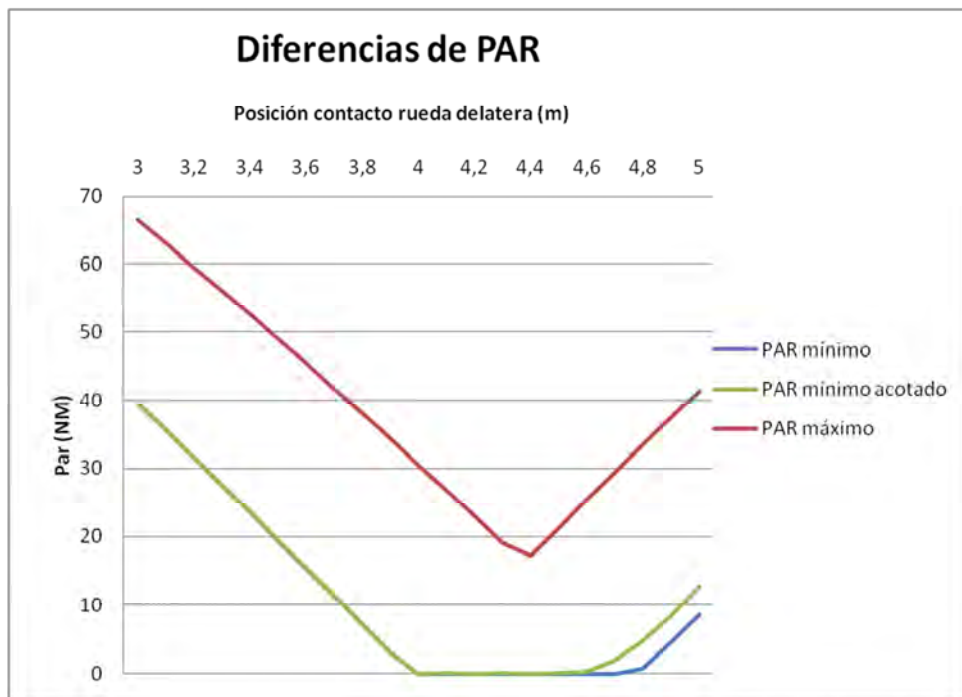
Gráfica 6. Parábola 0,10 mínimo par acotado

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

El ángulo acotado elegido para todo el proyecto es de 20 grados. Esto a efectos prácticos significa que entre posición y posición del UGV dentro de la trayectoria, la máxima variación angular que el vehículo puede llevar a cabo, es de 20 grados, en su ángulo de ataque trasero y delantero.

En la Gráfica 6 se pueden observar los valores del par en cada uno de los puntos, utilizando este criterio de selección.

Por su lado, en la Gráfica 7 se puede ver que en el caso de acotar los ángulos, la diferencia en los valores del par no es muy grande, y que el consumo extra que ésta supone, seguramente sea compensado con el menos consumo en los motores que varían los ángulos de ataque.

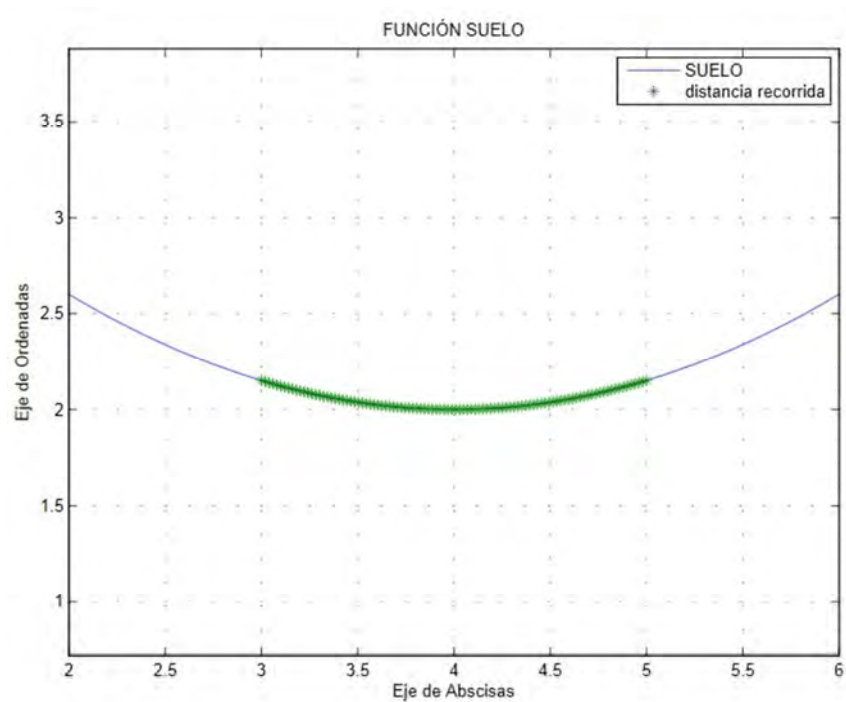


Gráfica 7. Parábola 0,10 Diferencias en el par

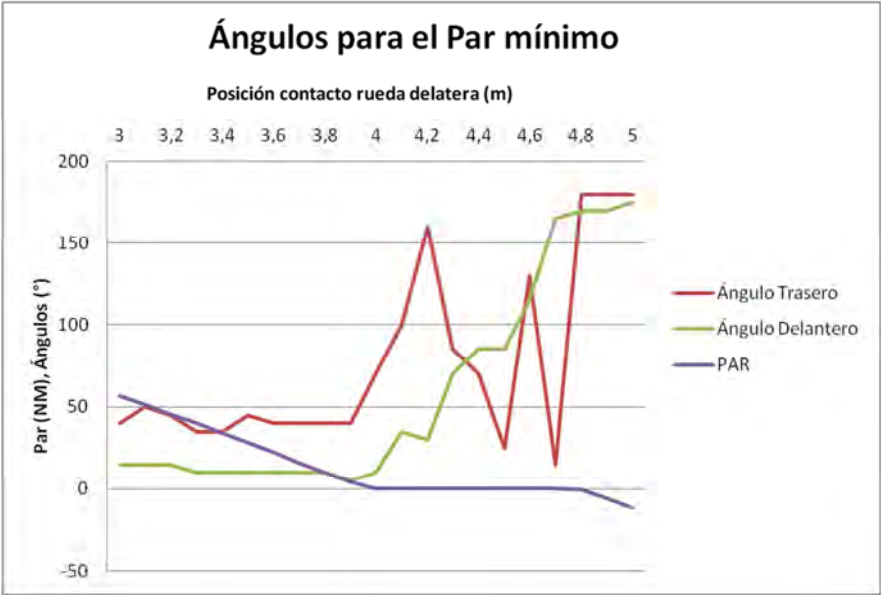
Además es importante comparar, que la mala elección de los ángulos de ataque puede llegar a ocasionar una necesidad mayor de par, de media 27,79 Nm. Estudiándolo en porcentajes, la diferencia entre optimizar la elección de los ángulos de ataque entre la peor condición posible, supone una reducción del par requerido en promedio del 79,71%, siendo la mínima reducción de par en un 40,75% y la máxima reducción de par en un 100%.

Se van a realizar dos pruebas cambiando el parámetro de la parábola que regula la curvatura, y haciendo que esta sea mayor para intentar verificar que todo lo anterior se cumple.

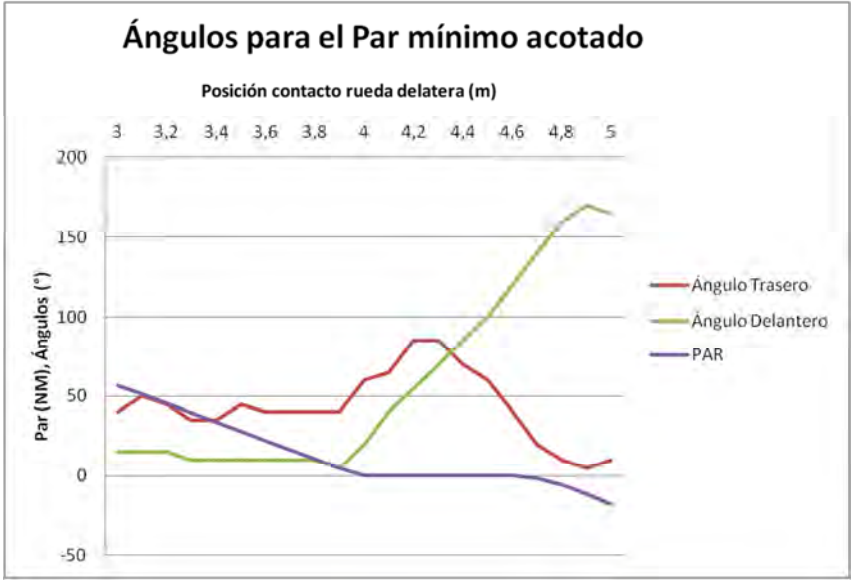
En la Gráfica 8 se puede observar la representación gráfica de la misma parábola pero con $A=0,15$.



Gráfica 8. Representación función suelo. Parábola $f = (0,15 * ((x-4)^2)) + 2$



Gráfica 9. Parábola 0,15 mínimo par

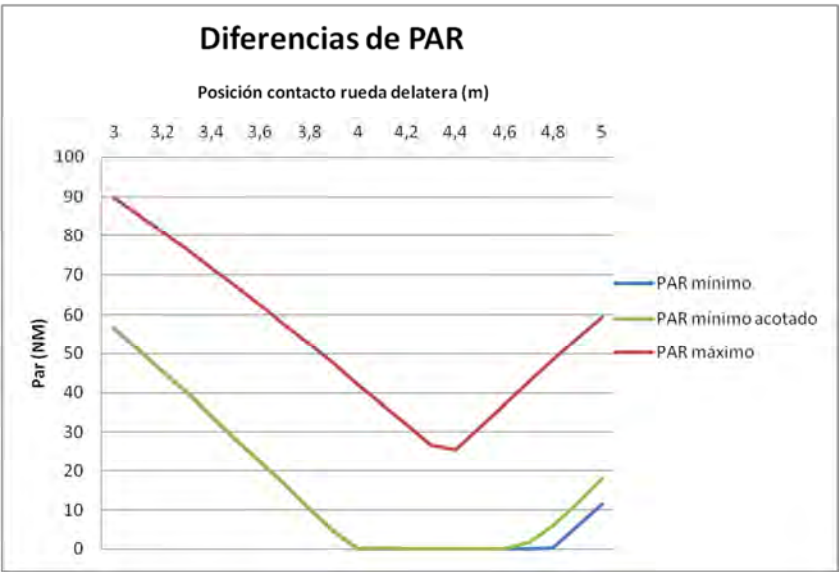


Gráfica 10. Parábola 0,15 mínimo par acotado

Al igual que en el caso anterior la reducción del par conseguida optimizando los ángulos de ataque es muy significativa.

Ahora como es de esperar debido a la mayor curvatura, la reducción promedio de par es de 38,14 Nm. En porcentaje sin embargo se ve algo reducido con respecto a la anterior, quedándose en un 78,81%. La mínima reducción porcentual que se registra en el caso más desfavorables es de un 36,96%.

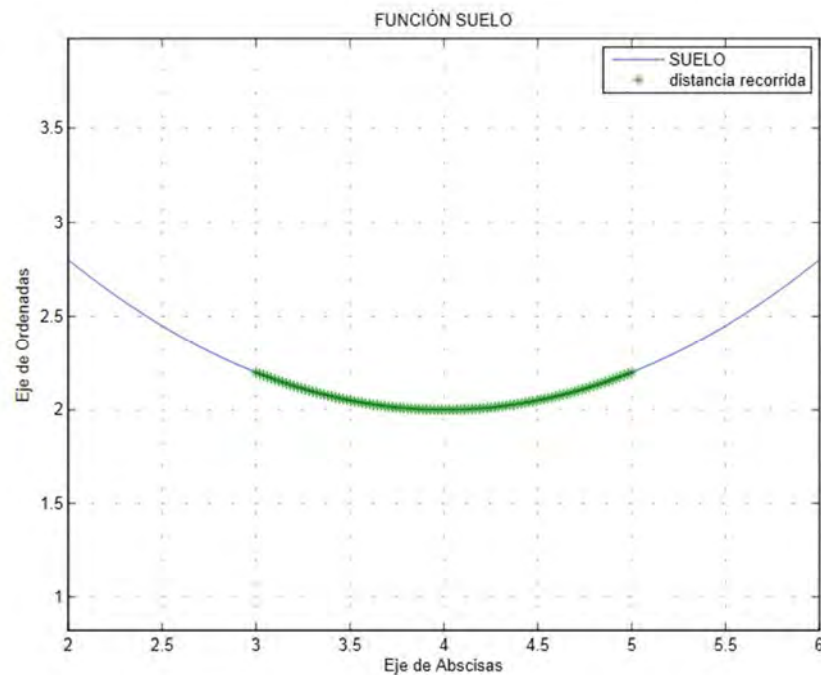
Como se puede deducir de estos datos, la reducción en el par que se consigue mediante la optimización de los ángulos de ataque es bastante significativa, siendo en este caso mayor en media al 75%. Además, en los casos más favorables, la reducción del par puede llegar a ser hasta de un 100%.



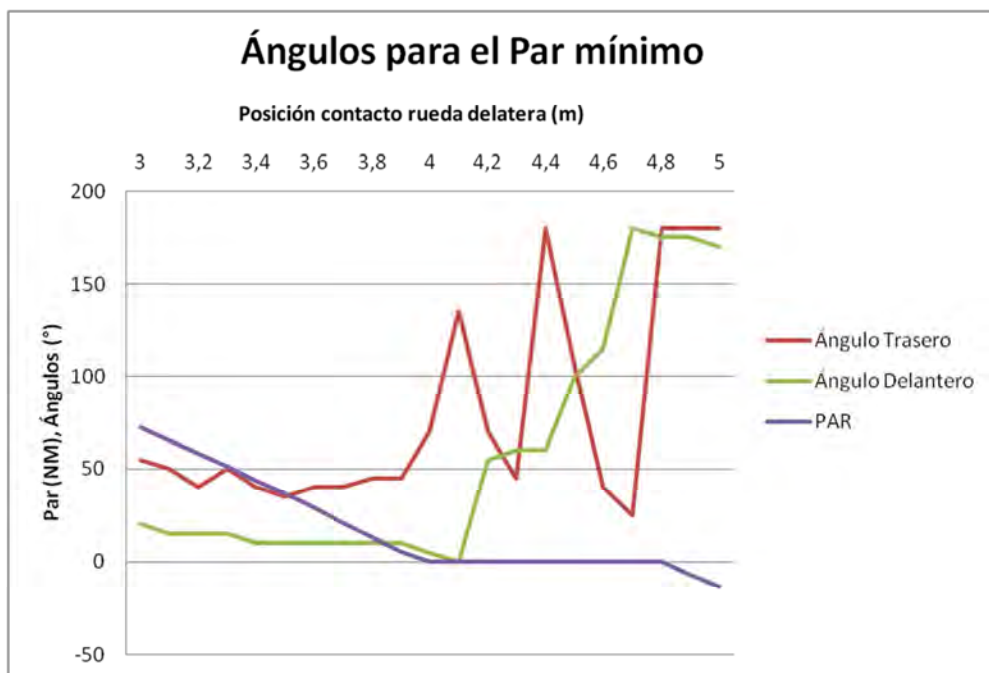
Gráfica 11. Parábola 0,15 Diferencias en el par

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

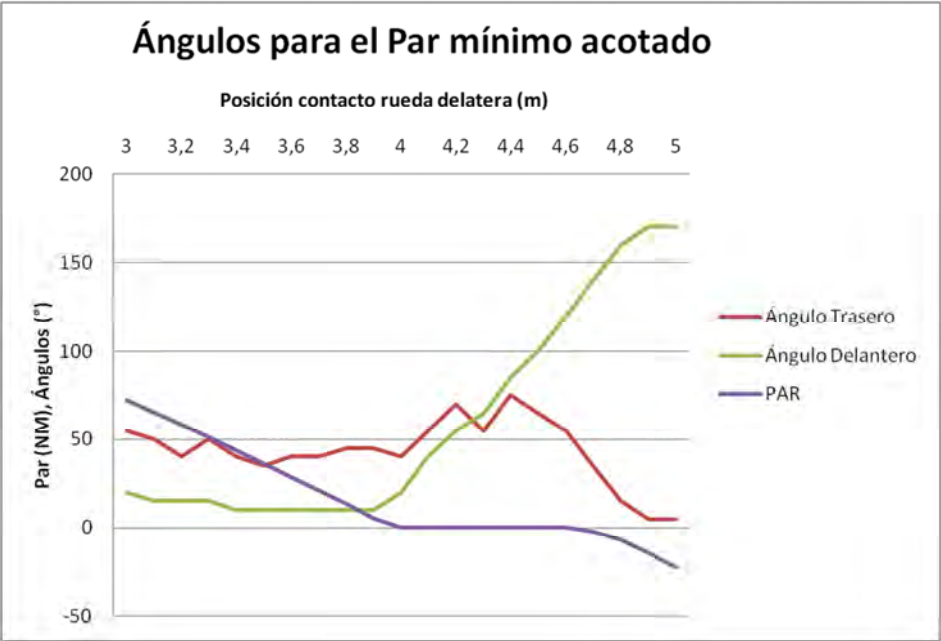
Por último se lleva a cabo un ensayo en el que A vale 0,20 aumentando aún más la curvatura de la parábola. En la Gráfica 12 se puede ver la representación gráfica de la parábola con esa curvatura.



Gráfica 12. Representación función suelo. Parábola $f = 0,20 * ((x-4)^2) + 2$



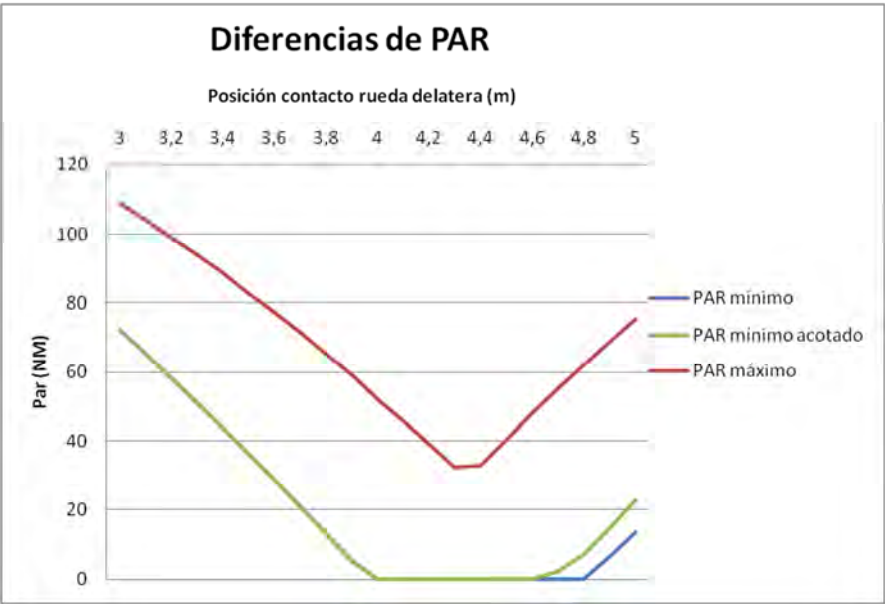
Gráfica 13. Parábola 0,20 mínimo par



En este último ensayo los resultados están en línea con los obtenidos en los dos anteriores.

Como en el caso anterior, debido al aumento de la curvatura, la reducción total promedio del Par aumenta hasta los 47,04 Nm. En cambio, a pesar de este aumento, la reducción en porcentaje del par se queda en un 78,13%, disminuyendo en algo menos de un 1% respecto a la parábola con $A=0,15$.

Por último la mínima reducción relativa registrada se queda en un 33,69% mientras que al igual que en los dos ensayos anteriores, la máxima reducción relativa es del 100%.



Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Valor de A	[m]	0,10	0,15	0,20
Reducción del Par requerido promedio	[Nm]	27,79	38,14	47,04
Reducción del Par requerido mínimo	%	40,75	36,96	33,7
Reducción del Par requerido máximo	%	100	100	100
Reducción del Par requerido promedio	%	79,71	78,81	78,14

Tabla 12. Función suelo Parábola Resumen datos de los resultados

Observando los datos que se recogen en la tabla se pueden extraer varias conclusiones.

A medida que aumenta la curvatura de la parábola se observa como la reducción promedia del par requerido aumenta considerablemente. También se puede llegar a la conclusión de que a medida que la curvatura aumenta, la optimización en determinados puntos del recorrido se hace algo menos efectiva. La reducción de par requerido promedio porcentualmente hablando, se puede considerar prácticamente constante para los tres valores de A, habiendo solo algo más de un 1% de diferencia entre los valores más extremos.

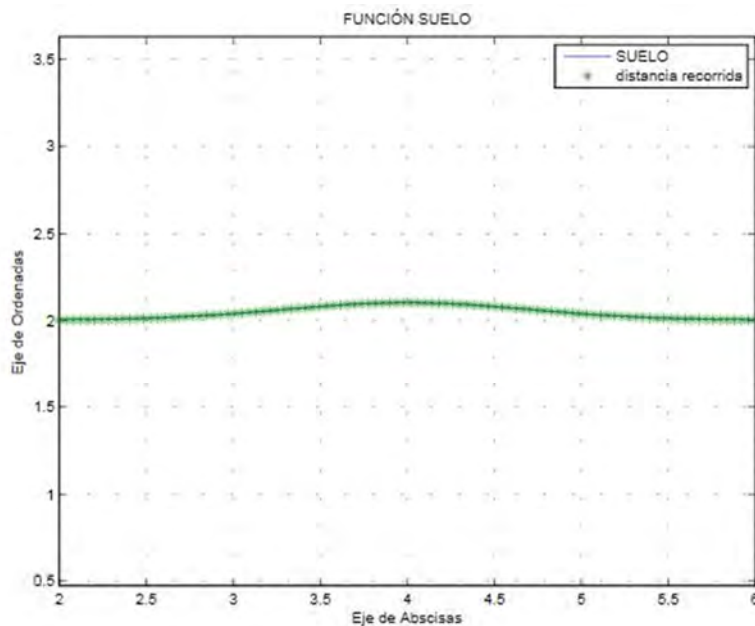
Función montaña

En este apartado se estudia cómo afectan los ángulos de ataque en el par requerido para recorrer una trayectoria de tipo montaña.

La expresión de la función de la trayectoria en función del parámetro A es:

$$f = (A \cdot e^{-(x-4)^2}) + 2$$

En la Gráfica 16 se puede ver observar la representación gráfica de la función:



Gráfica 16. Representación función suelo. Montaña $f = (0,1 \cdot (\exp(-(x-4)^2))) + 2$



Gráfica 17. Montaña 0,10 mínimo par



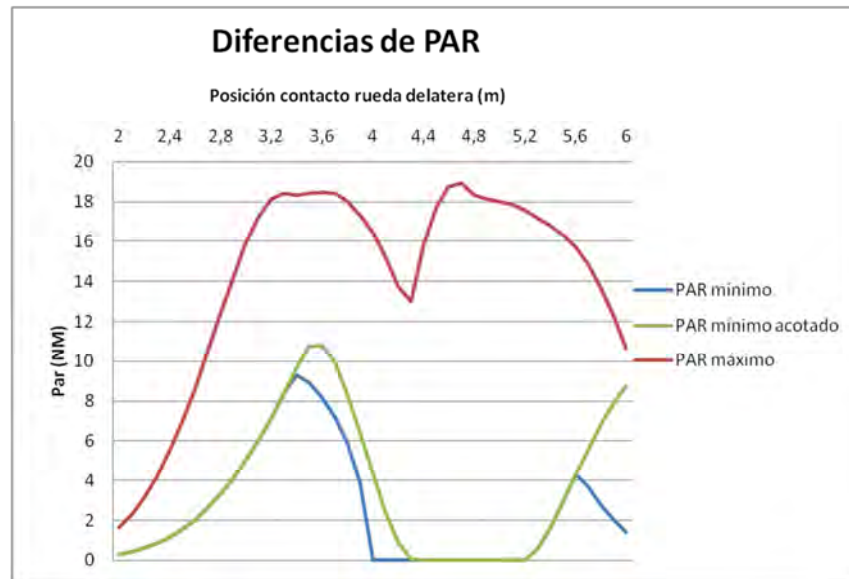
Gráfica 18. Montaña 0.10 mínimo par acotado

Tanto en la Gráfica 17 como en la Gráfica 18 es posible observar el mismo patrón en los valores del Par, a pesar de presentar ambas gráficas valores algo distintos.

Inicialmente, desde 2 m, el valor del Par aumenta en valor absoluto para ambas gráficas, debido a la pendiente que se puede ver en la representación de la función montaña. En el caso de la Gráfica 17 esta tendencia se mantiene hasta los 4 metros, mientras que en el caso de la Gráfica 18, que contiene los datos de la trayectoria con el par acotado, la tendencia se mantiene hasta los 4,3 metros. Desde ahí hasta los 5,2 metros el Par requerido en ambos casos es nulo, y a partir de los 5,3 metros y hasta el final el valor del Par aumenta debido al descenso que el vehículo lleva a lo largo de la montaña.

Además en ambas gráficas, debido a las características de la función suelo, se puede observar que en esta función, que tiene un obstáculo en medio, las variaciones de par entre posiciones son bastante más acusadas debido a los puntos de inflexión y los cambios de pendiente.

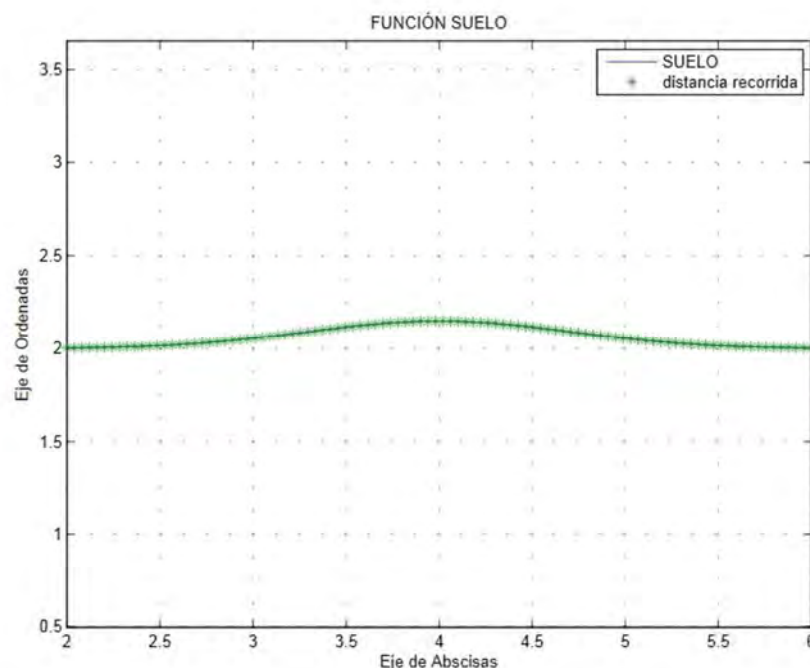
En la Gráfica 19 es posible ver la comparación entre el par requerido por el camino de mínimo par, el camino de mínimo par con los ángulos acotados, y el camino que requiere el par máximo. En esta gráfica se puede observar claramente como en este tipo de función suelo, la optimización de los ángulos de ataque es importantísima, habiendo en todo momento unas diferencias de Par muy grandes. Además se pueden observar diferencias importantes entre el camino de mínimo par acotado y el que no lo está.



Gráfica 19. Montaña 0,10 Diferencia de par

Analizando más a fondo los resultados reflejados en las gráficas es importante destacar que una mala optimización en los ángulos de ataque del UGV puede producir una diferencia promedio en los valores del Par requerido de hasta 11,68 Nm. Por otro lado la mínima reducción que se da es del 49,22%, mientras que en algunos puntos particulares se puede llegar a una reducción máxima de un 100% siendo la reducción en promedio en porcentaje del 81,81%. Como se puede deducir estos resultados son muy buenos y dan una idea de la importancia de la optimización de los ángulos de ataque. No obstante se procede a aumentar el valor de la constante A para comprobar estos resultados.

A continuación en la Gráfica 20 es posible ver la representación de la función suelo montaña con un valor de $A=0,15$. Esto a efectos prácticos provoca que el resalto que hay en medio de la trayectoria sea mayor afectando con ellos a los valores de Par requerido.



Gráfica 20. Representación función suelo. Montaña $f = (0,15 * (\exp(-(x-4)^2))) + 2$

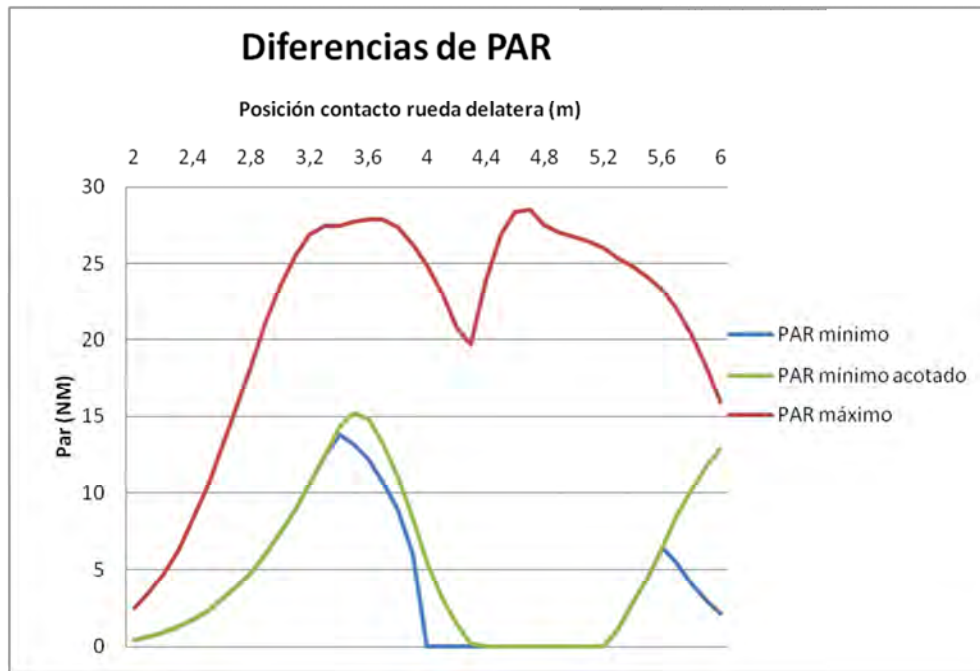


Gráfica 21. Montaña 0,15 mínimo par



Gráfica 22. Montaña 0,15 mínimo par acotado

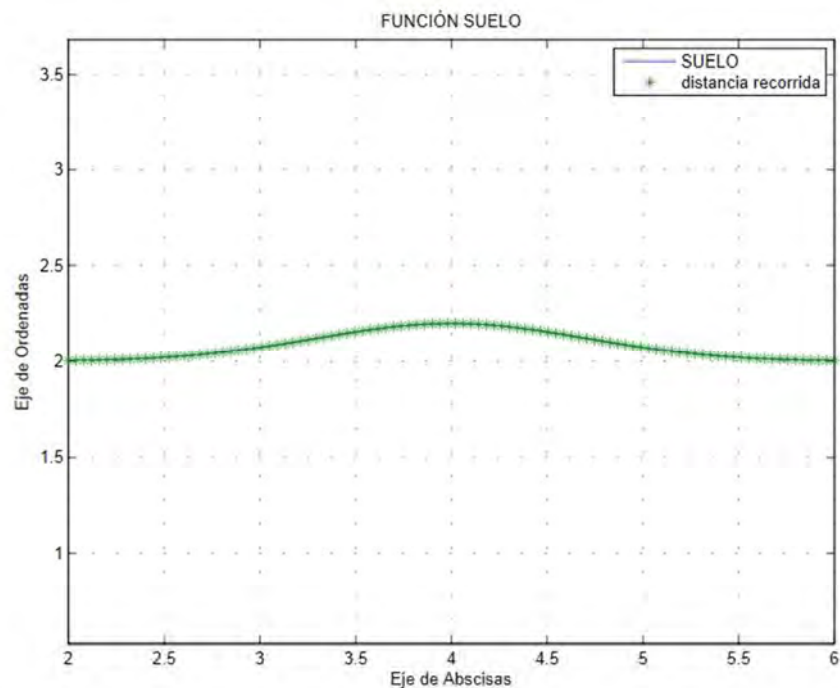
En la Gráfica 21 y la Gráfica 22 se recogen las gráficas del camino de mínimo par del camino de mínimo par acotado respectivamente. En el caso de la Gráfica 23 están pintadas las gráficas de par requeridas del par mínimo, del par mínimo acotado y del par máximo. Al igual que en el caso anterior las diferencias del máximo con las otras dos siguen siendo muy importantes.



Gráfica 23. Montaña 0,15 Diferencia de par

En este caso la mala elección de los ángulos de ataque puede suponer de promedio una diferencia de 17,47 Nm. Si el dato se toma de manera relativa, el valor alcanza un 81,83% de diferencia promedio. Por otro lado la mínima reducción de par que se da es del 49,57% aunque esta en los casos más favorables puede llegar al 100%.

En último lugar se procede al aumento de la constante A que toma un valor de 0,20. En la Gráfica 24 es posible ver su representación.



Gráfica 24. Representación función suelo. Montaña $f = (0,2 * (\exp(-(x-4)^2))) + 2$

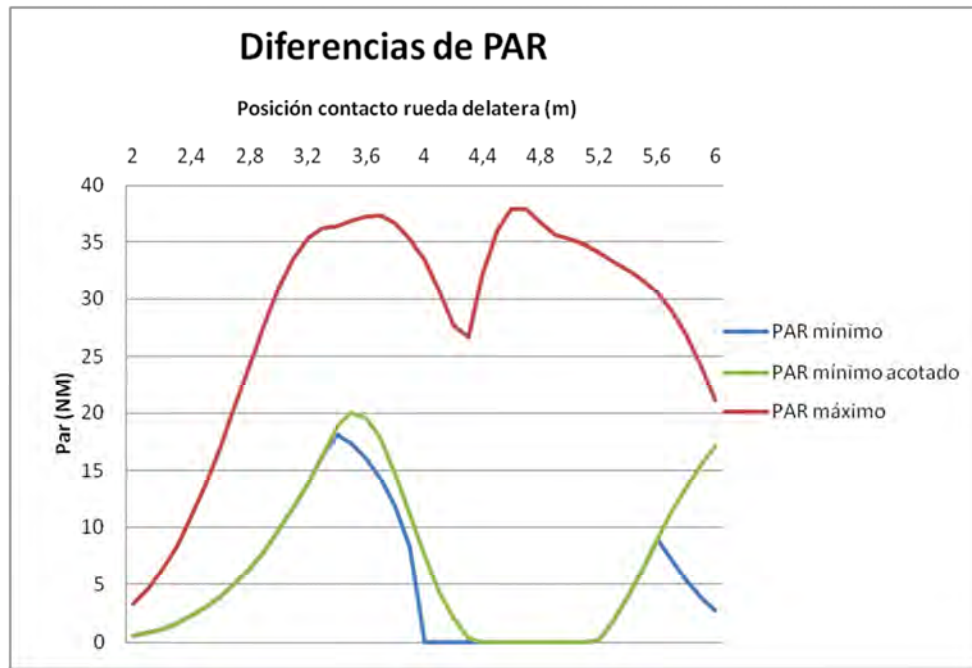


Gráfica 25. Montaña 0,20 mínimo par



Gráfica 26. Montaña 0,20 mínimo par acotado

Al igual que en los dos casos anteriores están disponibles las gráficas de las configuraciones angulares de mínimo Par, Par acotado, y la comparación entre estas y la configuración de máximo Par.



Gráfica 27. Montaña 0,20 Diferencia de par

En este caso la reducción promedio del par requerido es de 23,16 Nm. Consiguiendo una reducción promedio del 81,75%. Además el mínimo valor de reducción está en un 49,97% y el máximo, al igual que en los dos casos anteriores, está en un 100%. Con todos estos resultados se puede decir que en este caso es muy importante intentar llevar a cabo una optimización en la elección de los ángulos de ataque, mayor que en el caso de la función suelo parábola.

En la se puede ver un resumen de los datos de reducción obtenidos.

Valor de A	[m]	0,10	0,15	0,20
Reducción del Par requerido promedio	[Nm]	11,68	17,47	23,16
Reducción del Par requerido mínimo	%	49,22	49,57	49,97
Reducción del Par requerido máximo	%	100	100	100
Reducción del Par requerido promedio	%	81,8	81,81	81,73

Tabla 13. Función suelo Montaña Resumen datos de los resultados

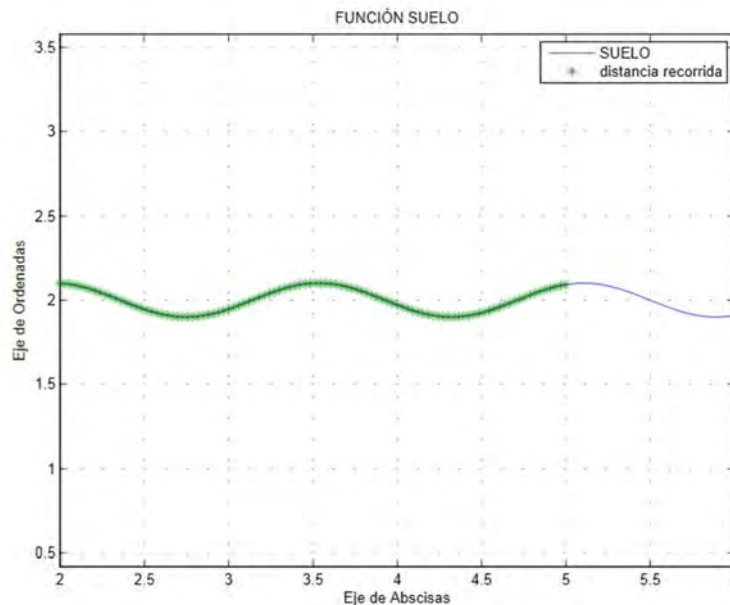
Analizando los datos de la tabla, la optimización a medida que el resalto aumenta debido a la variación de la constante A, se observa que la optimización no mejora, teniendo en todos los casos un valor muy parecido. Además, es posible recalcar que cuanto mayor sea el resalto a superar, la configuración más desfavorable tiende a incrementar la necesidad de par requerido en mayor proporción que la configuración de mínimo par. Los datos no varían lo suficiente para considerar que a mayor resalto, se obtiene una mejor optimización.

Función Seno

En esta parte se utiliza la función seno para obtener resultados:

$$f = (0,10 \cdot \sin(4 \cdot x)) + 2$$

En la Gráfica 28 es posible ver la representación de la función:

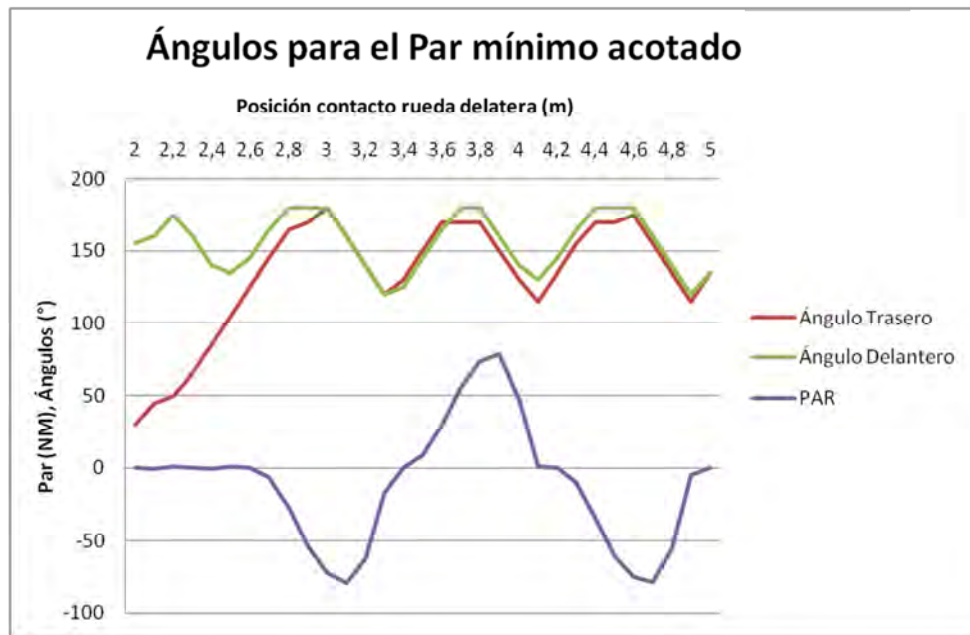


Gráfica 28. Representación función suelo. Seno $f=(0.10 \cdot \sin(4 \cdot X))+2$

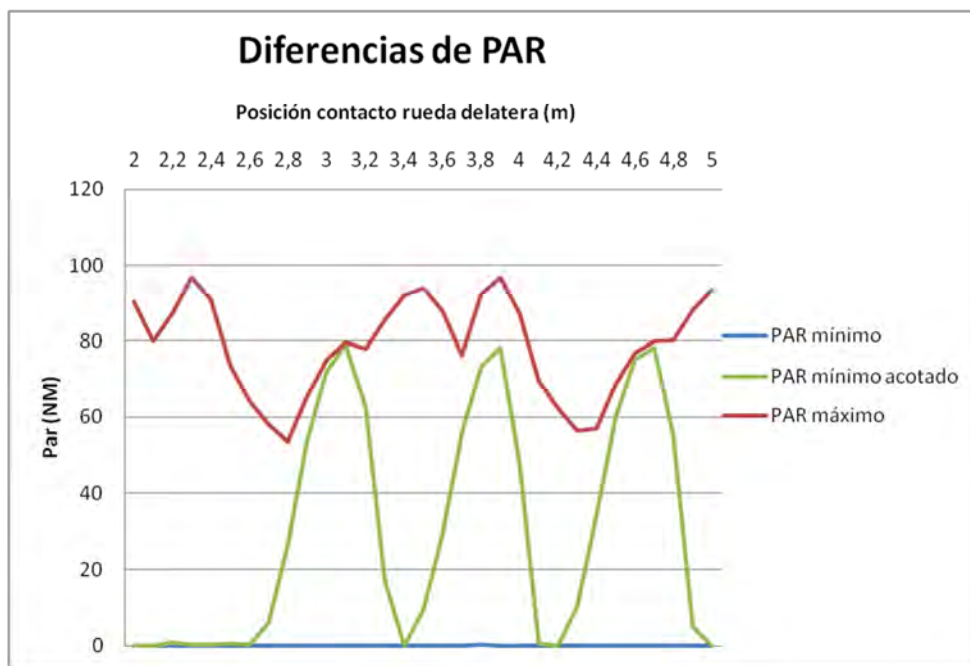
En la Gráfica 29 se muestra la configuración correspondiente al camino de mínimo Par para la función seno. En la Gráfica 30 se muestran las configuraciones para Par mínimo acotado. Por último en la Gráfica 31 se pueden ver la comparación del Par requerido para el camino de mínimo par, el camino de mínimo Par acotado con 20 grados, y el camino correspondiente al Par máximo.



Gráfica 29. Seno mínimo par



Gráfica 30. Seno mínimo par acotado 20 grados



Gráfica 31. Seno Diferencia de mínimo par acotado 20 grados

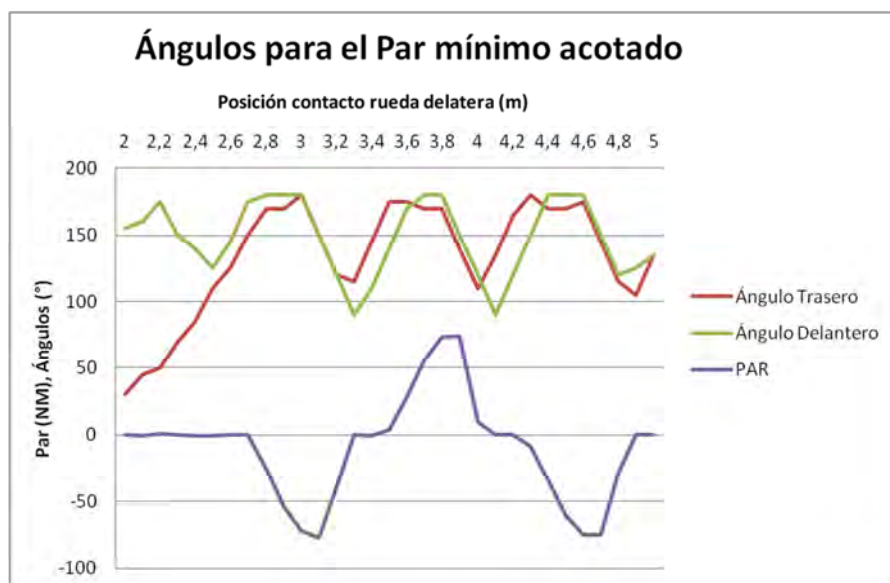
En la Tabla 14 se pueden ver los resultados comparativos entre la optimización de mínimo par y la peor configuración de ángulos posible. Se puede ver que en el peor caso de optimización se consigue una reducción del 78,6% del par requerido, mientras que en el caso más favorable es del 100%. No obstante el dato mas significativo de esta tabla se encuentra en la reducción promedio del par requerido el cual se encuentra en un 99,90%

Valor de A	[m]	0,10
Reducción del Par requerido promedio	[Nm]	78,6
Reducción del Par requerido mínimo	%	99,69
Reducción del Par requerido máximo	%	100
Reducción del Par requerido promedio	%	99,92

Tabla 14. Función suelo Seno Resumen datos de los resultados

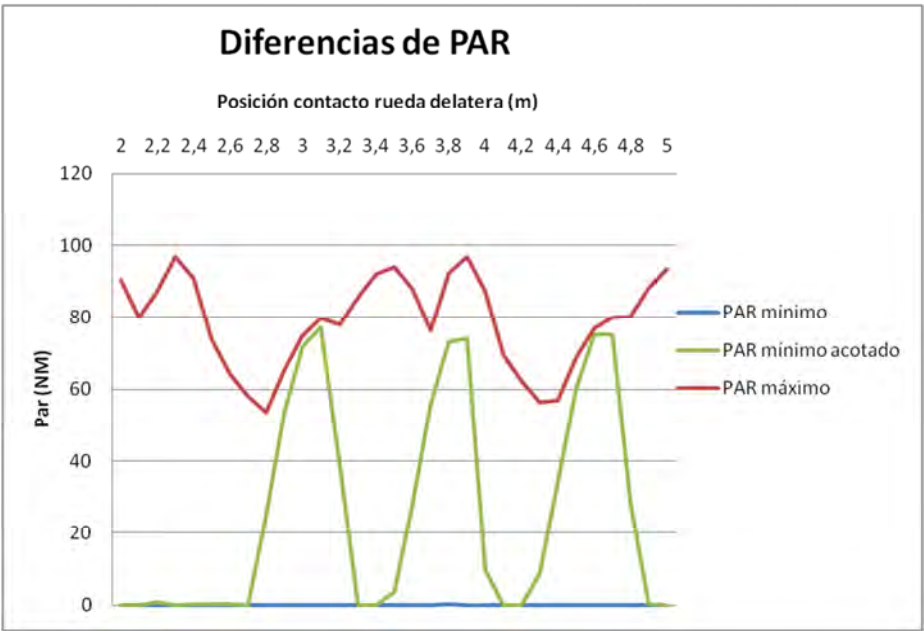
Nos obstante, tal y como se puede ver en la Gráfica 31, a partir de 2,7 metros el par en valor absoluto para el camino de par mínimo acotado aumenta de forma muy rápida. Esto significa que por alguna razón el valor de ángulo acotado no se ajusta muy bien a esta función suelo por lo que es recomendable aumentar el ángulo acotado en busca de alguna solución algo mejor.

En la Gráfica 32 se obtiene el camino optimizado para el mínimo par con un ángulo acotado de 30 grados.

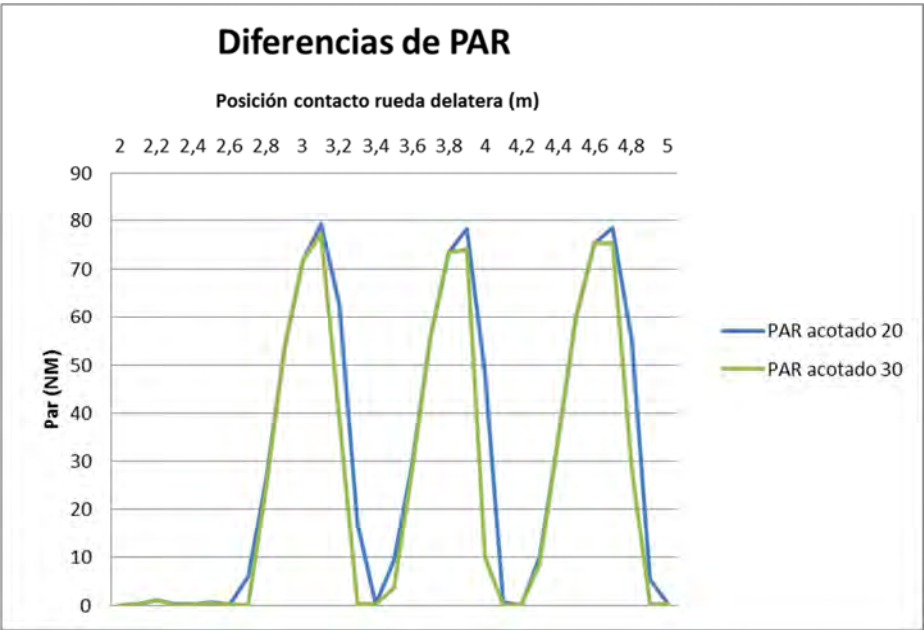


Gráfica 32. Seno mínimo par acotado 30 grados

Si se observa la Gráfica 33 en la que se compara el Par acotado, con el Par acotado para 30 grados y el Par máximo, es posible ver que el problema con el camino de Par mínimo acotado con 30 grados persiste, variando solo que el momento en el que empieza a subir el par de manera notoria es en 2,8 metros. Esto se puede observar de manera más clara en la Gráfica 34, donde se ve que los valores de la trayectoria con el par acotado a 30 grados quedan un poco por debajo que los de 20, aunque la diferencia no es importante.



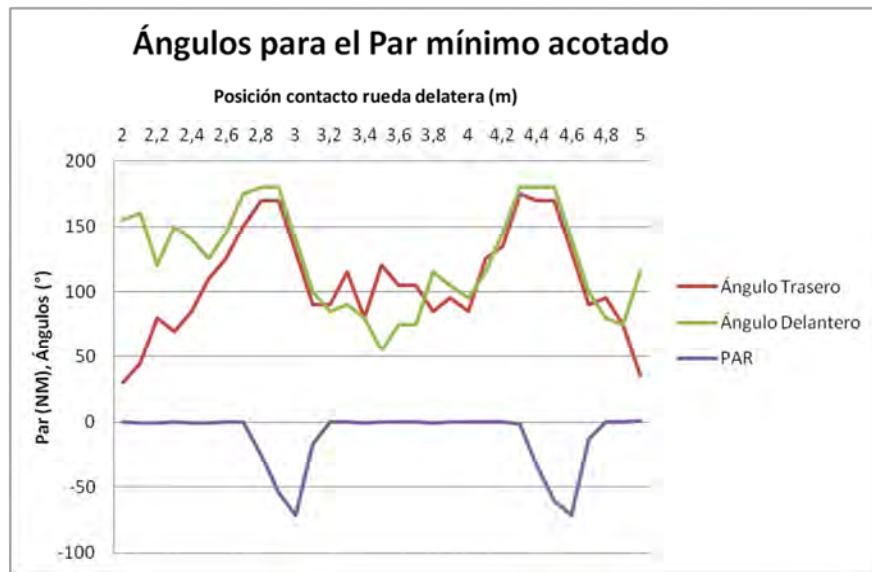
Gráfica 33. Seno Diferencia de mínimo par acotad 30 grados



Gráfica 34. Seno Diferencia entre acotado de 20 y 30 grados

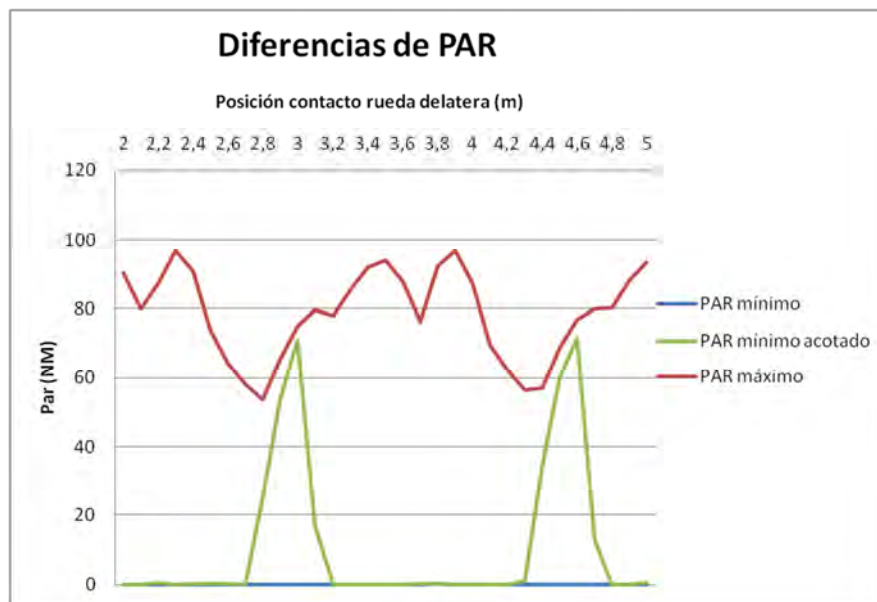
Por todo lo dicho anteriormente se puede suponer que este valor de ángulo acotado no se adapta lo suficiente a las características de la función seno.

Por esto se lleva a cabo un nuevo ensayo en el que el valor del ángulo acotado es 40 grados. En la Gráfica 35 se ven los resultados de la trayectoria óptima con el ángulo acotado a 40 grados. Apparently parece que parte del problema se ha solventado, presentando un pico menos de los tres que había presentes en los otros ángulos acotados.



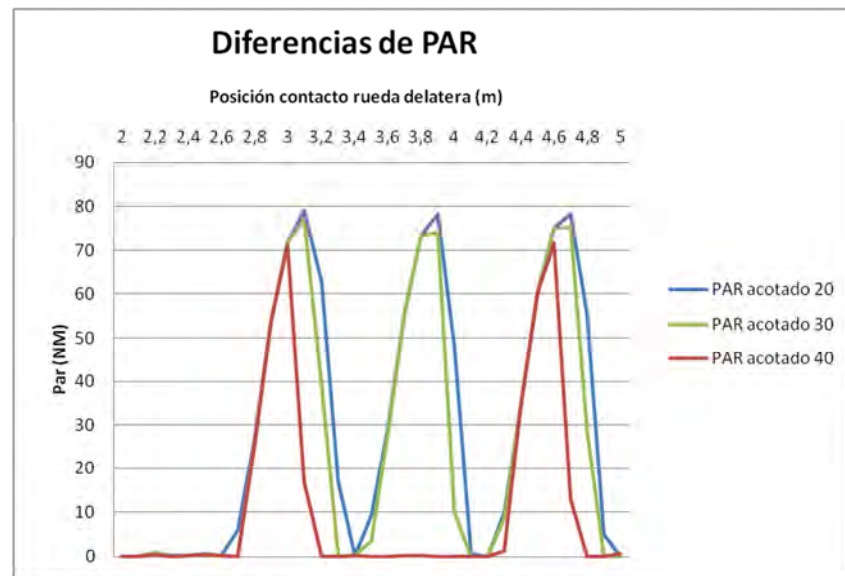
Gráfica 35. Seno mínimo par acotado 40

En la Gráfica 36 es posible observar como al utilizar un ángulo de acotación de 40 grados, el par requerido se adapta algo más al correspondiente al camino del mínimo par, aunque a partir de 2,7 metros en el primer caso, y 4,4 metros en el segundo, se pueden ver dos picos de par requerido que tienen valores muy altos.



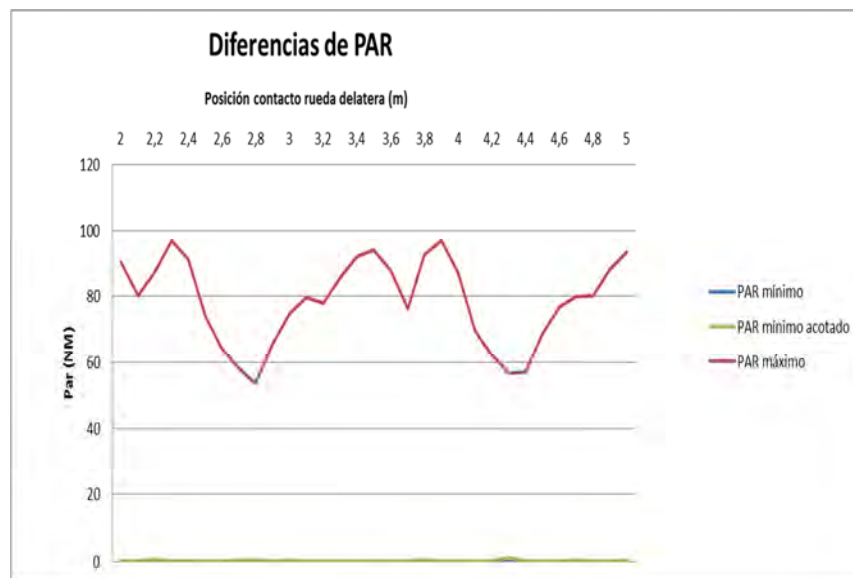
Gráfica 36. Seno Diferencia de mínimo par acotado 40 grados

En la Gráfica 37 se muestra una comparación entre cada uno de los casos con ángulos acotados que han sido estudiados. En ella se puede observar claramente como en el caso del camino de mínimo par acotado con 40 grados no se puede ver el aumento de par que hay en el centro de las gráficas y que si se puede ver en los resultados con ángulos acotados de 20 y 30 grados.



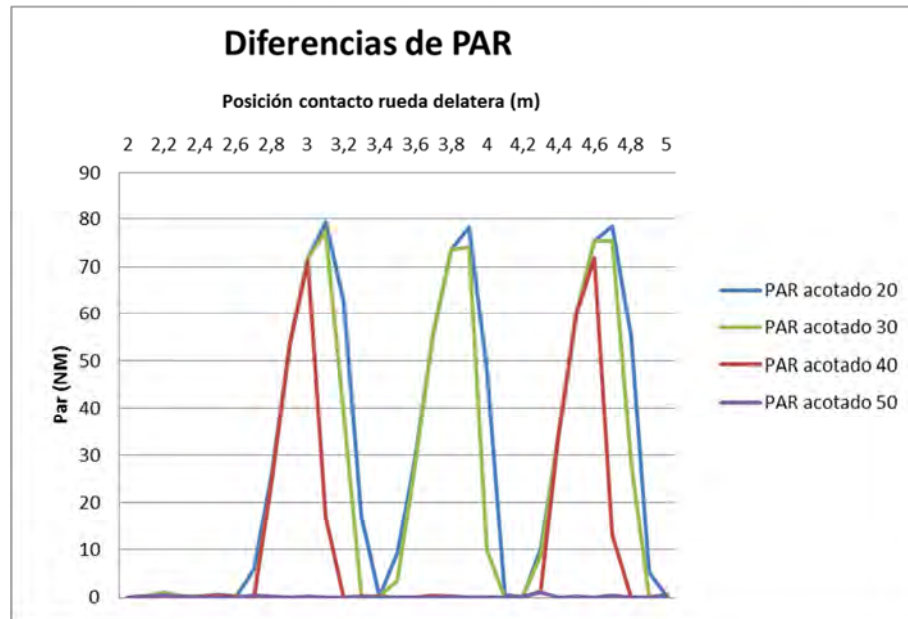
Gráfica 37. Seno Diferencia de par 20, 30 y 40

Por último debido a que al utilizar 40 como ángulo acotado no se obtienen los resultados esperados se lleva a cabo un último ensayo en el que el ángulo acotado sea 50 grados.



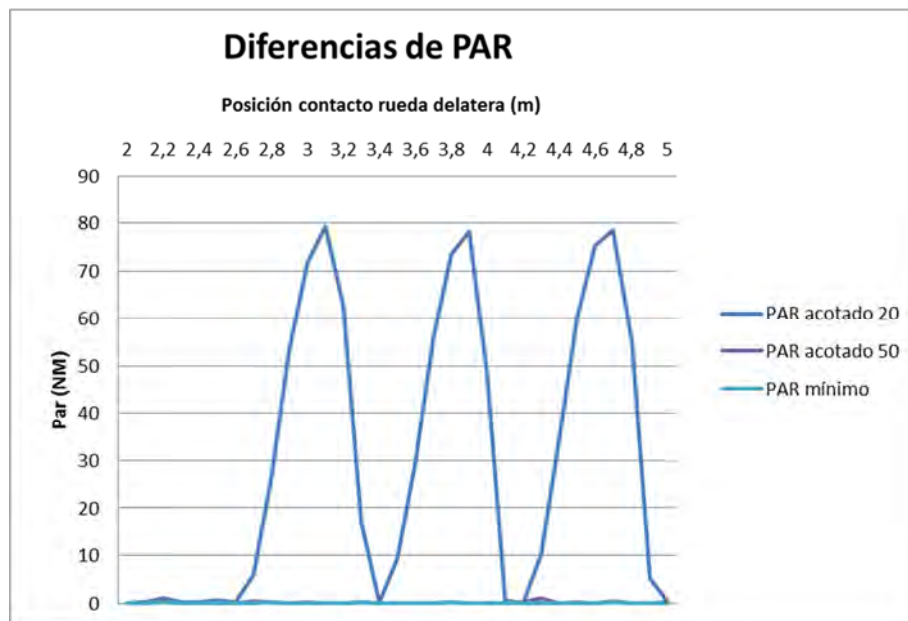
Gráfica 38. Seno mínimo Par acotado 50 grados

En la Gráfica 38 están los resultados del camino de par mínimo con ángulo de acotado de 50 grados. En este caso el par se ajusta mucho al camino mínimo y no tiene ninguna región que destaque especialmente por tener valores excesivamente altos como ocurría con los anteriores ángulos tal y como muestra la Gráfica 39.



Gráfica 39. Seno Diferencias de par entre 20, 30, 40 y 50 grados

Por último en la Gráfica 40 se puede ver una comparación entre el camino de par mínimo y el camino de par mínimo con el ángulo acotado de valor 20 y 50 grados.



Gráfica 40. Seno Diferencias de par entre 20, 50 y par mínimo

En ella se puede observar perfectamente la increíble mejora en el par requerido que aporta la optimización con el ángulo acotado de valor 50 grados frente al que tiene el ángulo acotado de valor 20 grados.

Una vez realizadas todas estas pruebas y ensayos, la conclusión que se puede alcanzar es que a la hora de decidir qué tipo de ángulo acotado se debe escoger, este dependerá en gran medida de la función suelo en la que estemos llevando a cabo nuestros ensayos.

Esto es así porque al contrario que lo que pasaba en la función Recta, en la función Parábola, y en la función Montaña, en la función suelo Seno el ángulo acotado de 20 grados no

era capaz de ajustarse ni lo más mínimo a los valores alcanzados por el camino de par mínimo, lo que hacía que la optimización de esa forma resultara inútil.

Cabe destacar que por otro lado, y como ya se comentó al principio del proyecto, no conviene mucho aumentar mucho el ángulo acotado, ya que el ahorro de energía que podemos obtener debido al menor par requerido, puede ser menor que el sobre gasto de energía eléctrica producido por el movimiento de los motores que orientan los brazos del vehículo. No obstante, en este caso, debido a la gran diferencia de par requerido que había, seguramente merecería la pena.

CAPÍTULO VI:

CONSLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones

Se ha realizado un algoritmo de optimización el cual cumple con los objetivos marcados al principio del proyecto:

- Se ha conseguido crear un modelo básico en 2D el cual es configurable tanto en las dimensiones como en las masas de los elementos que lo forman.
- Realiza un análisis de equilibrio cuasi-estático basado en las leyes que gobiernan el movimiento de un UGV y es aplicable a cualquier función suelo.
- Resuelve las fuerzas que gobiernan al UGV en cada posición de la trayectoria y para cualquier configuración angular del UGV independientemente del signo de la pendiente de la trayectoria.
- Consigue llevar a cabo una optimización de los ángulos de ataque de dos formas distintas, la primera buscando la configuración mínima de par requerida, y la segunda buscando la configuración de par mínimo considerando un ángulo de acotamiento.
- El programa es capaz de funcionar para cualquier función suelo que el usuario defina.

Además, se ha verificado la validez del algoritmo evaluando los resultados obtenidos y comparándolos con los resultados de otros algoritmos que no resolvían el problema discretizando, obteniéndose además datos correctos y lógicos:

- El par necesaria para ascender una recta es directamente proporcional a la pendiente de la misma y además es constante si ésta también lo es, con independencia de la configuración angular del vehículo.
- El par necesario para ascender una curva es directamente proporcional a la curvatura de la misma, a mayor curvatura mayor es el par requerido con independencia de la configuración angular del vehículo.
- La optimización de la elección de los ángulos de ataque se puede llevar a cabo en cualquier circunstancia pero solo en situaciones favorables, como en cambios de inclinación o curvatura, la optimización consigue mejoras significativas.

Trabajos futuros

A continuación de la realización de este proyecto, se plantean una serie de trabajos o mejoras que podían realizarse como continuación de éste:

- Realización del mismo proyecto pero considerando las 3 dimensiones del vehículo.
- Llevar a cabo una modelización gráfica del vehículo en algún programa CAD, que permita llevar a cabo la representación del vehículo a lo largo de toda la trayectoria.
- Optimizar la elección del ángulo acotado para cada tipo de función.
- Modificación del programa para que éste tenga en cuenta si es posible adoptar ciertas configuraciones angulares considerando el relieve de la trayectoria.
- Calcular para cada punto de la trayectoria, las posibles configuraciones angulares que den lugar a un vuelco del vehículo en la dirección longitudinal del mismo.
- Implementar 'Error inclusión función suelo'

Bibliografía

Bibliografía

- [1] E.V.Krick, introducción a la ingeniería y al diseño en la ingeniería, México: Limusa, 1973 [reimpresión 2008].
- [2] <<i>Robot.com>>. [En línea].

<http://www.irobot.com/us/learn/defense/packbot.aspx>

[Último acceso: 2 de Junio de 2014].
- [3] <<Globalsecurity.org>> [En línea].

Available: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/gladiator.htm>

[Último acceso: 2 de Junio de 2014].
- [4] <<Unmannedsystemstechnology.com>> [En línea].

Available: <http://www.unmannedsystemstechnology.com/2012/11/qinetiq-north-america-receives-8-4m-orders-for-talon-unmanned-robot/>

[Último acceso: 2 de Junio de 2014].
- [5] <<Mechachan.com>> [En línea].

Available: <http://mechachan.com/r/res/20.html>

[Último acceso: 2 de Junio de 2014].
- [6] C. Pérez López, Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y en la ingeniería, Madrid: Prentice Hall, 202.
- [7] M. Gil Rodríguez, Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia ingeniería / Manuel Gil Rodríguez, Madrid: Díaz de Santos, 2003.
- [8] E. Corral Abad, J. Meneses y G. Aryassov, «A quasi-static approach to optimize the motion of an UGV depending on the track profile».
- [9] V. E. Miranda, «Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral,» Proyecto fin de Carrera.
- [10] Mathworks, «Documentation Center,» [En línea].

Available: <http://www.mathworks.es/es/help/>.

[Último acceso: 2 de Junio de 2014].

- [11] «Shephardmedia.com,» [En línea].

Available: <http://www.shephardmedia.com/news/uvonline/uv-europe-2011-unmanned-snatch-a-work-in-progress/9271/>.

[Último acceso: 6 de Junio de 2014].

- [12] Geogebra. [En línea].

Available: <http://www.geogebra.org/cms/es/>.

[Último acceso: 6 de Junio de 2014].

- [13] R. Sancibrian, «Cinemática y Dinámica de Máquinas. Métodos analíticos de análisis cinemático.,» 2008. [En línea].

Available: <http://personales.unican.es/sancibrr/Asignaturas/CyDdM/CapIII2.pdf>.

[Último acceso: 6 de Junio de 2014].

Anexos

Anexo 1. Glosario

Ad	[°]	Ángulo entre el cuerpo y el brazo delantero
At	[°]	Ángulo entre el cuerpo y el brazo trasero
AngD	[°]	Pendiente de la trayectoria en el punto de contacto de la rueda delantera
AngT	[°]	Pendiente de la trayectoria en el punto de contacto de la rueda trasera
R	[m]	Radio de la rueda
l	[m]	Longitud del brazo o barra
L	[m]	Longitud del cuerpo
H	[m]	Altura del cuerpo
d	[m]	Diagonal del cuadrilátero
mc	[Kg]	Masa del cuerpo
mb	[Kg]	Masa de un brazo
mr	[Kg]	Masa de una rueda
μ	[rad]	Inclinación del vehículo
$\mu 2$	[rad]	Ángulo formado entre la barra trasera y la recta de inclinación del vehículo.
λ	[rad]	Inclinación del cuerpo respecto a la horizontal
θ	[rad]	Inclinación del brazo delantero respecto a la horizontal sobre la trayectoria
fpol		Función de la trayectoria
xmin	[m]	Punto en el que comienza la simulación
xmax	[m]	Punto en el que termina la simulación
x	[m]	Vector de los puntos de la trayectoria discretizados en x
y	[m]	Vector de los puntos de la trayectoria discretizados en y
x1m	[m]	Vector de los puntos de la trayectoria de los cdg de las ruedas discretizados en x
fx1m	[m]	Vector de los puntos de la trayectoria de los cdg de las ruedas discretizados en y
D(a,b)		Matriz que almacena la distancia entre los cdg de las ruedas para cada una de las posibles configuraciones angulares
d	[m]	Distancia desde el cdg de la rueda delantera a un punto que es posible cdg de la rueda trasera
RESULT(a,b,i)		Almacena la posición del punto de contacto de la rueda trasera con la trayectoria
xbd	[m]	Coordenada x del centro de masas del brazo delantero
ybd	[m]	Coordenada y del centro de masas del brazo delantero
xbt	[m]	Coordenada x del centro de masas del brazo trasero
ybt	[m]	Coordenada y del centro de masas del brazo trasero
Cmx	[m]	Coordenada x del centro de masas del cuerpo
Cmy	[m]	Coordenada y del centro de masas del cuerpo
xct	[m]	Coordenada x del centro de gravedad del sistema 1
yct	[m]	Coordenada y del centro de gravedad del sistema 1
G2x	[m]	Coordenada x del centro de gravedad del sistema 2
G2y	[m]	Coordenada y del centro de gravedad del sistema 2
G3x	[m]	Coordenada x del centro de gravedad del sistema 3
G3y	[m]	Coordenada y del centro de gravedad del sistema 3
A(a,b)	[N]	Matriz A
Nd(a,b,i)	[N]	Fuerza normal en la rueda delantera

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

$N_t(a,b,i)$	[N]	Fuerza normal en la rueda trasera
$F_d(a,b,i)$	[N]	Fuerza tangente en la rueda delantera
$F_t(a,b,i)$	[N]	Fuerza tangente en la rueda trasera
$M(a,b,i)$	[Nm]	Momento en la rueda

Anexo 2. Código de programación

Código de Algoritmo principal

```
function [ ft,nt,fd,nd,par,ang,Result,AdR,AtR] = FPolPruebaExcelS(
fpol,xmin,xmax,XK,DivD,DivT)
%De los elementos de entrada podemos explicar que:
%fpol: es la ecuación de la trayectoria del vehículo.
%xmin: El punto inicial de la trayectoria que queremos estudiar.
%xmax: El punto final de la trayectoria que queremos estudiar.

%A continuación voy a definir la dimensiones del vehículo [m]:

L=0.832; %longitud del cuerpo del vehículo.
l=0.35; %Longitud de los brazos.
Rc=0.1; % Radio de las ruedas.% r=0.1
r=Rc;
H=0.336; % Es el alto del cuerno del vehículo

%A continuación defino las posibilidades de movimiento de las patas:
ValorInicioAd=0;
ValorFinalAd=180;
RangoAd=ValorFinalAd-ValorInicioAd;
DivisionesAd=DivD;

ValorInicioAt=0;
ValorFinalAt=180;
RangoAt=ValorFinalAt-ValorInicioAt;
DivisionesAt=DivT;

% Ahora defino las masas de los distintos elementos del vehículo [Kg]:

mr=50;
mc=300;
mb=20;

%Defino la constante de Discretización mediante la cual podremos dar mayor
%o menor precisión a nuestro programa:

a=(L+l+l+Rc+Rc)/XK; %Constante que define la distancia que separa
% cada uno de los puntos de nuestra discretización

%Ahora debo definir los vectores que serán la discretización de nuestra
%función. Para ello antes del primer punto que debemos calcular, tal y como
%viene especificado en los argumentos de nuestro programa, debo añadir una
%región de puntos de una longitud mayor que la de nuestro vehículo
%totalmente estirado, con la finalidad de conseguir que la rueda trasera
%del vehículo se encuentre dentro de los puntos discretizados, y poder
%llevar a cabo los cálculos pertinentes.

a1=xmin;

a0=a1-(XK+1)*a;

%Defino la parte previa del recorrido:
for i=1:1:(XK+1)
    f(i)=a0;
    a0=a0+a;
end
x1=f';

%Ahora discretizo la parte a estudiar:
```

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

```
x2=[xmin:a:xmax]';

%Añado este último punto para asegurarme de que el último punto que calculo
%está en la discretización

x2=[x2;xmax];

%Ahora combino las dos partes del recorrido:

x=[x1;x2];

% Ahora evaluo la expresión especificada en los argumentos de la función:

y=subs(fpol,x);

if length(x)>length(y)
    val=y;
    y(1:length(x))=val;
    y=y';
end

%Con esto obtenemos los vectores x e y, que son la discretización de
%nuestra función.

%El siguiente paso es crear los vectores de los ángulos de las patas
%delantera y trasera, y pasarlas de grados a radianes:

Ad=[ValorInicioAd:(RangoAd/DivisionesAd):ValorFinalAd]; % ángulo delantero
At=[ValorInicioAt:(RangoAt/DivisionesAt):ValorFinalAt]; % ángulo trasero

AdR=Ad;
AtR=At;

%Ahora paso las unidades de ambos vectores a radianes:
Ad=Ad*(pi/180);
At=At*(pi/180);

%Ahora inicializo los vectores que almacenarán las posiciones de los
%centros de gravedad de las ruedas:

n=length(x);
xlm = ones(n,1);
fxlm = ones(n,1);

% También inicializo el vector que almacenará la pendiente del camino en
% cada uno de los puntos de cálculo, para utilizarla al final durante la
% resolución del problema de fuerzas:

ang=ones(n,1);

%En primer lugar obtengo las pendientes del primer punto y el último.
%La forma de cálculo será mediante la función polyfit que me permite
%obtener la pendiente que se obtiene al realizar una regresión lineal sobre
%una nube o conjunto de puntos.
%Para el primer punto solo lo haremos con los dos primeros puntos de
%nuestro vector x:

n=length(x);
Xprincipio=x(1:2); % Dos primeras coordenadas X
Yprincipio=y(1:2); % Dos primeras coordenadas y
Rprincipio=polyfit(Xprincipio,Yprincipio,1); % Me calcula la ecuación de la
recta entre esos 3 puntos.
pdteprincipio=Rprincipio(1); %pendiente
Thetaprincipio=atan(pdteprincipio);
```

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

```
%Además añadido al vector ang, definido antes, el valor correspondiente al
%primer punto.

ang(1)=Thetaprincipio;

%Con estas última líneas calculo el punto correspondiente a la trayectoria
%del centro de gravedad del primer punto.

senoprincipio=abs(sin(Thetaprincipio));
cosenoprincipio=abs(cos(Thetaprincipio));
if Rprincipio(1)>=0
    xlm(1) = x(1) - Rc*senoprincipio;
    fxlm(1) = y(1) + Rc*cosenoprincipio;
end
if Rprincipio(1)<0
    xlm(1) = x(1) + Rc*senoprincipio;
    fxlm(1) = y(1) + Rc*cosenoprincipio;
end

%Ahora llevo a cabo el mismo procedimiento con el punto del final:

n=length(x);
XFinal=x(n-1:n);
YFinal=y(n-1:n);
RFinal=polyfit(XFinal,YFinal,1);
pdteFinal=RFinal(1);
ThetaFinal=atan(pdteFinal);

%Además añadido al vector ang, definido antes, el valor correspondiente al
%último punto.

ang(n)=ThetaFinal;

%Con estas última líneas calculo el punto correspondiente a la trayectoria
%del centro de gravedad del último punto.

senoFinal=abs(sin(ThetaFinal));
cosenoFinal=abs(cos(ThetaFinal));

if RFinal(1)>=0
    xlm(n) = x(n) - Rc*senoFinal;
    fxlm(n) = y(n) + Rc*cosenoFinal;
end
if RFinal(1)<0
    xlm(n) = x(n) + Rc*senoFinal;
    fxlm(n) = y(n) + Rc*cosenoFinal;
end

% Ahora procedo al cálculo de la pendiente en el resto de los puntos que lo
% llevaré a cabo con tres puntos.

for i=2:n-1;

% Llevamos a cabo el cálculo de la pendiente con tres puntos.

X=x(i-1:i+1);
Y=y(i-1:i+1);
R=polyfit(X,Y,1);
pdte=R(1);
Theta=atan(pdte);

%Además añadido al vector ang, definido antes, el valor correspondiente al
%al punto:

ang(i)=Theta;

%Con estas última líneas calculo el punto correspondiente a la trayectoria
```

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

```
%del centro de gravedad del punto.

seno=abs(sin(Theta));
coseno=abs(cos(Theta));

if R(1)>=0
    x1m(i) = x(i) - Rc*seno;
    fx1m(i) = y(i) + Rc*coseno;
end
if R(1)<0
    x1m(i) = x(i) + Rc*seno;
    fx1m(i) = y(i) + Rc*coseno;
end
end

%Ahora obtengo todas las posibles distancias entre los centros de masas de
%las ruedas delantera y trasera en función de la configuración angular del
%vehículo.

for i=1:length(Ad)
    for j=1:length(At)
        D(i,j)=sqrt(((L-l*cos(At(j))-l*cos(Ad(i)))^2)+((l^2)*(sin(At(j))-
sin(Ad(i)))^2));
    end
end

%A continuación voy a llevar a cabo el cálculo de la posición de la rueda
%trasera en función de la configuración angular del vehículo y de la
%posición de la rueda delantera.
%Este cálculo solo lo voy a llevar a cabo a partir de la posición XK del
%vertos x e y, ya que esa es la primera posición en la que se encuentran
%los puntos en los que debemos calcular nuestros resultados.

%Defino en primer lugar dos constantes que actúen como contadores y nos
%permitir viajar a lo largo de las posibles configuraciones angulares:

cAd=length(Ad);
cAt=length(At);

for i=(XK+2):length(x)

    for a=1:cAd
        for b=1:cAt
            %Creo una nueva variable para poder ir retrocediendo a lo largo
            %de los puntos.
            Valor=zeros(n,1);
            v=i;

            while v>1
                v=v-1;
                Valor(v)=sqrt((((x1m(v)-x1m(i))^2)+(((fx1m(v)-fx1m(i))^2)))));
                if Valor(v)>D(a,b) %Esto ocurre cuando nos hemos "pasado"
                    %el punto

                    if abs(Valor(v+1)-D(a,b))>abs(Valor(v)-D(a,b))
                        Result(a,b,i)=v;
                        v=0;
                    else
                        Result(a,b,i)=v+1;
                        v=0;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
```

```

%Ahora voy a llevar a cabo el planteamiento del problema de fuerzas. Voy a
%calcular las posiciones de los centros de gravedad de todos los elementos
%de nuestro UGV.
%Para ello antes hay que resolver el problema con las ecuaciones y los tres
%sistemas planteados para llevar a cabo la resolución del mismo.

for i=(XK+2):length(x)
    for a=1:cAd
        for b=1:cAt
            PT=Result(a,b,i);
            %Ahora localizo las posiciones de los centros de gravedad de
            %las ruedas delantera y trasera y las posiciones de los puntos
            %de contacto con la superficie de las ruedas delantera y
            %trasera también.
            %Centro de gravedad Rueda delantera:
            xcd=xlm(i);
            ycd=fxlm(i);
            %Punto de contacto de la rueda delantera:
            xd=x(i);
            yd=y(i);
            %Centro de gravedad de la rueda trasera:
            xct=xlm(PT);
            yct=fxlm(PT);
            %Punto de contacto de la rueda trasera:
            xt=x(PT);
            yt=y(PT);

            %Ahora resuelvo la configuración angular de nuestro vehículo
            %mediante trigonometría.

            mu=atan((ycd-yct)/(xcd-xct));
            M=D(a,b);

            %A continuación llevo paso a paso los cálculos necesarios para
            %obtener mu2
            mu2=acos((-((1*cos(At(b)))*(L-1*cos(Ad(a)))-
                1*cos(At(b))))+(1*sin(At(b))*(1*sin(Ad(a))-
                1*sin(At(b)))))/(1*M));

            %Ahora Cálculo los dos ángulos que me permitirán obtener las
            %coordenadas de los centros de gravedad de cada una de las
            %piezas del vehículo:
            landa=(2*pi)-mu2-At(b)-Ad(a)-mu;
            teta=-pi+At(b)+mu+mu2;

            %cdg brazo delantero:
            xbd= xcd-(1/2)*cos(landa);
            ybd=ycd+(1/2)*sin(landa);

            %cdg brazo trasero:
            xbt= xct+(1/2)*cos(mu+mu2);
            ybt=ycct+(1/2)*sin(mu+mu2);

            %Ahora calculo el cdg del cuerpo del vehículo:
            Cmx=xct+1*cos(mu2+mu)+(L/2)*cos(teta)-(H/2)*sin(teta);
            Cmy=yct+1*sin(mu2+mu)+(L/2)*sin(teta)+(H/2)*cos(teta);

            %Ahora recupero la pendiente de la trayectoria para cada uno de
            %los puntos que la necesitamos:
            angT=ang(PT);
            angd=ang(i);

            %Además, se que para el cálculo de las fuerzas:
            xe=xcd;
            ye=ycd;

            %En primer lugar calculo las coordenadas del centro de gravedad

```

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

```

%G2:
G2x=( (mc*Cmx)+(xbd*mb)+(xbt*mb)+(mr*xct) ) / (mc+mr+2*mb) ;
G2y=( (mc*Cmy)+(ybt*mb)+(ybd*mb)+(mr*yct) ) / (mc+mr+2*mb) ;

%Ahora defino los vectores dependientes de G2
%Vector G2E:
G2Ex=xe-G2x;
G2Ey=ye-G2y;

%Vector G2T:
G2Tx=xt-G2x;
G2Ty=yt-G2y;

%Ahora calculo las coordenadas del centro de gravedad G3:
G3x=( (mc*Cmx)+(xbd*mb)+(xbt*mb)+(mr*xct)+(mr*xcd) ) / (mc+mr+mr+2*mb) ;
G3y=( (mc*Cmy)+(ybt*mb)+(ybd*mb)+(mr*yct)+(mr*ycd) ) / (mc+mr+mr+2*mb) ;

%Ahora defino los vectores dependientes de G3:
%Vector G3D:
G3Dx=xd-G3x;
G3Dy=yd-G3y;

%Vector G3T:
G3Tx=xt-G3x;
G3Ty=yt-G3y;

A1=[cos(angt), -sin(angt), cos(angd), -sin(angd),0];
A2=[sin(angt),cos(angt),sin(angd),cos(angd), 0];
A3=[r, 0 , 0, 0, 1];
A4=[-
G2Ty*cos(angt)+G2Tx*sin(angt),G2Ty*sin(angt)+G2Tx*cos(angt),-
G2Ey*cos(angd)+G2Ex*sin(angd), G2Ey*sin(angd)+G2Ex*cos(angd),-1];
A5=[-G3Ty*cos(angt)+G3Tx*sin(angt),
G3Ty*sin(angt)+G3Tx*cos(angt), -G3Dy*cos(angd)+G3Dx*sin(angd),
G3Dy*sin(angd)+G3Dx*cos(angd), 0];

A=[A1;A2;A3;A4;A5];

g=9.81;
C=[ 0 ; (2*mr+mc+2*mb)*g ; 0 ; G2Ex*(mr)*g ; 0];
W=A\C;

Ft(a,b,i)=W(1);
Nt(a,b,i)=W(2);
Fd(a,b,i)=W(3);
Nd(a,b,i)=W(4);
PAR(a,b,i)=W(5);

end
end
end

ft=Ft;
nt=Nt;
fd=Fd;
nd=Nd;
par=PAR;

end

```

Algoritmo para calcular todos los caminos

```
function [ MatrizResultados,MatrizResultadosMin, MatrizResultadosMax,
MatrizResultadosMinAcotada ] = resultados( Funcion,VectorX,DivD,DivT,XK )
c=XK+2;
%Inicializo algunas variables:
MatrizResultadosMinAcotada=zeros(length(VectorX),10);
MatrizResultados=zeros(length(VectorX),10);
contador=1;
    for i=1:length(VectorX)

        ContadorMin=1;
        [ Ft,Nt,Fd,Nd,Par,ang,Result,AdR,AtR]= FPolPruebaExcelS(
Funcion,VectorX(i),(VectorX(i)+0.05),XK,DivD,DivT);
        ang=ang*(180/pi);
        for a=1:(DivD+1)
            for b=1:(DivT+1)
                PT=Result(a,b,c);
                Posicion=VectorX(i);
                ft=Ft(a,b,c);
                nt=Nt(a,b,c);
                fd=Fd(a,b,c);
                nd=Nd(a,b,c);
                par=Par(a,b,c);
                angDelant=ang(c);
                angTra=ang(PT);
                adR=AdR(a);
                atR=AtR(b);

MatrizResultados(contador,:)= [Posicion,angTra,angDelant,atR,adR,par,nt,nd,ft,fd];

                contador=contador+1;

%PARTE CORRESPONDIENTE A LA OBTENCIÓN DEL CAMINO DE PAR MÍNIMO Y MÁXIMO Y
ACOTADO

MatrizResultadosParaMin(ContadorMin,:)= [Posicion,angTra,angDelant,atR,adR,par,
nt,nd,ft,fd,abs(par)];
                ContadorMin=ContadorMin+1;

            end
        end

        %OBTENCIÓN DEL CAMINO MÍNIMO ACOTADO

        %ALGORITMO PARA LA OBTENCIÓN DEL CAMINO DE PAR MÍNIMO:

        MatrizOrdenMin=sortrows(MatrizResultadosParaMin,11);
        MatrizResultadosMin(i,:)=MatrizOrdenMin(1,1:10);%SE PUEDE OBTENER TAMBIÉN
LA COLUMNA EMPLEADA PARA ORDENAR

        %ALGORITMO PARA LA OBTENCIÓN DEL CAMINO DE PAR MÁXIMO:
        MatrizOrdenMax=sortrows(MatrizResultadosParaMin,-11);
        MatrizResultadosMax(i,:)=MatrizOrdenMax(1,1:10);

        %CAMINO DE MÍNIMO PAR ACOTADO:
        Acotado=30;
        if i==1
            MatrizResultadosMinAcotada(1,1:10)=MatrizOrdenMin(1,1:10);%SE PUEDE
OBTENER TAMBIÉN LA COLUMNA EMPLEADA PARA ORDENAR
            ContadorAcotado=(DivD+1)*(DivT+1);
        else
            w=1;
            while w<=ContadorAcotado
```

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

```
        if abs(MatrizResultadosMinAcotada(i-1,4)-
MatrizOrdenMin(w,4))<=Acotado

            if abs(MatrizResultadosMinAcotada(i-1,5)-
MatrizOrdenMin(w,5))<=Acotado

MatrizResultadosMinAcotada(i,1:10)=MatrizOrdenMin(w,1:10);
                w=5000000000000;

            end

        end
        w=w+1;
    end
end

end

%MATRICES DE RESULTADOS FINALES
MatrizResultados;
MatrizResultadosMin
MatrizResultadosMax;
MatrizResultadosMinAcotada;
%GRABAR DATOS
xlswrite('Montaña A=0,2.xlsx',MatrizResultados,'Resultados','A3')
xlswrite('Montaña A=0,2.xlsx',MatrizResultadosMin,'MatrizResultadosMin','A3')
xlswrite('Montaña A=0,2.xlsx',MatrizResultadosMax,'MatrizResultadosMax','A3')
xlswrite('Montaña
A=0,2.xlsx',MatrizResultadosMinAcotada,'MatrizResultadosMinAcotada 30','A3')

end
```


Anexo 3. Tablas de resultados

Función suelo Parábola

- Parámetro A=0,1

Tabla 15. Par mínimo función Parábola con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-14,24	-11,31	40	10	39,4	-1163,6	5374,5	-393,8	-393,8
3,1	-12,87	-10,20	35	10	35,6	-1156,5	5386,9	-355,6	-355,6
3,2	-11,78	-9,09	35	10	31,6	-1088,4	5334,6	-315,6	-315,6
3,3	-10,67	-7,97	35	10	27,5	-1017,1	5277,7	-275,4	-275,4
3,4	-10,24	-6,84	45	10	23,5	-754,2	5024,6	-235,0	-235,0
3,5	-9,12	-5,71	45	10	19,4	-695,2	4977,4	-194,2	-194,2
3,6	-7,52	-4,57	35	5	15,4	-706,1	4999,9	-154,1	-154,1
3,7	-6,58	-3,43	40	10	11,3	-578,4	4879,9	-113,5	-113,5
3,8	-5,45	-2,29	40	10	7,2	-504,7	4812,9	-72,4	-72,4
3,9	-4,31	-1,15	40	10	3,1	-428,7	4741,9	-31,3	-31,3
4	-2,28	0,00	25	10	0,0	0,4	4316,0	0,0	0,0
4,1	-4,21	1,15	70	40	0,0	919,6	3400,0	0,3	0,3
4,2	-4,74	2,29	85	55	0,0	1410,7	2912,9	-0,1	-0,1
4,3	-1,42	3,43	15	65	0,0	3051,3	1268,3	0,1	0,1
4,4	-7,58	4,57	175	60	0,0	1635,2	2704,1	0,0	0,0
4,5	-3,30	5,71	65	105	0,0	2740,5	1588,3	0,2	0,2
4,6	-2,05	6,84	40	125	0,0	3324,3	1001,3	0,1	0,1
4,7	-7,52	7,97	120	155	0,0	2243,0	2113,1	-0,2	-0,2
4,8	-8,63	9,09	180	170	-0,7	2197,9	2170,6	6,7	6,7
4,9	-7,51	10,20	180	170	-4,6	2217,1	2150,1	46,2	46,2
5	-6,38	11,31	180	170	-8,6	2236,0	2128,3	85,6	85,6

Tabla 16. Par mínimo acotado función Parábola con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-14,24	-11,31	40	10	39,4	-1163,6	5374,5	-393,8	-393,8
3,1	-12,87	-10,20	35	10	35,6	-1156,5	5386,9	-355,6	-355,6
3,2	-11,78	-9,09	35	10	31,6	-1088,4	5334,6	-315,6	-315,6
3,3	-10,67	-7,97	35	10	27,5	-1017,1	5277,7	-275,4	-275,4
3,4	-10,24	-6,84	45	10	23,5	-754,2	5024,6	-235,0	-235,0
3,5	-9,12	-5,71	45	10	19,4	-695,2	4977,4	-194,2	-194,2
3,6	-7,52	-4,57	35	5	15,4	-706,1	4999,9	-154,1	-154,1
3,7	-6,58	-3,43	40	10	11,3	-578,4	4879,9	-113,5	-113,5
3,8	-5,45	-2,29	40	10	7,2	-504,7	4812,9	-72,4	-72,4
3,9	-4,31	-1,15	40	10	3,1	-428,7	4741,9	-31,3	-31,3
4	-2,28	0,00	25	10	0,0	0,4	4316,0	0,0	0,0
4,1	-1,14	1,15	25	25	-0,1	2141,6	2175,7	0,5	0,5
4,2	-0,78	2,29	30	40	0,0	3208,2	1109,4	0,2	0,2
4,3	-0,23	3,43	25	50	0,1	4074,2	242,7	-1,1	-1,1
4,4	-0,48	4,57	30	70	0,0	3903,8	414,0	0,2	0,2
4,5	-0,82	5,71	30	90	0,1	3798,3	521,2	-1,3	-1,3
4,6	-0,77	6,84	20	110	-0,3	3834,1	485,8	3,3	3,3
4,7	-0,61	7,97	15	130	-2,0	3740,3	579,4	20,3	20,3
4,8	-0,16	9,09	10	150	-4,7	3659,4	658,0	47,1	47,1
4,9	0,69	10,20	5	165	-8,4	3618,2	693,6	83,8	83,8
5	1,83	11,31	10	165	-12,7	3614,2	688,6	126,6	126,6

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 17. Par máximo función Parábola con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-26,31	-11,31	180	180	66,5	1777,5	2343,7	-664,6	-664,6
3,1	-25,46	-10,20	180	180	63,1	1802,1	2343,6	-630,6	-630,6
3,2	-24,60	-9,09	180	180	59,6	1827,1	2342,2	-596,2	-596,2
3,3	-23,73	-7,97	180	180	56,1	1852,3	2339,5	-561,4	-561,4
3,4	-22,85	-6,84	180	180	52,6	1877,8	2335,5	-526,2	-526,2
3,5	-21,95	-5,71	180	180	49,1	1903,5	2330,2	-490,8	-490,8
3,6	-21,05	-4,57	180	180	45,5	1929,4	2323,4	-455,0	-455,0
3,7	-20,04	-3,43	180	170	41,6	1948,3	2322,6	-416,4	-416,4
3,8	-19,11	-2,29	180	170	38,0	1975,7	2311,7	-380,3	-380,3
3,9	-18,17	-1,15	180	175	34,4	2001,6	2301,1	-343,8	-343,8
4	-17,13	0,00	180	170	30,5	2023,2	2293,2	-304,8	-304,8
4,1	-16,17	1,15	180	175	26,8	2048,1	2280,6	-267,8	-267,8
4,2	-15,11	2,29	180	170	22,9	2071,1	2268,3	-228,7	-228,7
4,3	-14,13	3,43	180	180	19,1	2091,1	2257,5	-190,7	-190,7
4,4	1,21	4,57	40	5	-17,3	-23,4	4336,2	172,9	172,9
4,5	2,35	5,71	40	5	-21,3	50,6	4257,0	213,5	213,5
4,6	3,50	6,84	40	5	-25,4	125,6	4175,1	253,7	253,7
4,7	5,03	7,97	35	5	-29,5	159,2	4130,8	295,3	295,3
4,8	6,17	9,09	35	5	-33,5	245,2	4034,4	334,9	334,9
4,9	7,30	10,20	35	5	-37,4	331,5	3936,0	374,2	374,2
5	8,42	11,31	35	5	-41,3	417,9	3836,0	413,0	413,0

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

- Parámetro A=0,15

Tabla 18. Par mínimo función Parábola con A=0,15

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-20,57	-16,70	40	15	56,6	-1623,8	5716,2	-565,9	-565,9
3,1	-19,98	-15,11	50	15	51,1	-1233,2	5352,5	-511,2	-511,2
3,2	-18,04	-13,50	45	15	45,5	-1246,2	5403,5	-455,0	-455,0
3,3	-15,79	-11,86	35	10	39,9	-1306,0	5499,8	-399,3	-399,3
3,4	-14,18	-10,20	35	10	34,1	-1212,7	5434,3	-340,7	-340,7
3,5	-13,55	-8,53	45	10	28,2	-893,9	5134,5	-281,6	-281,6
3,6	-11,48	-6,84	40	10	22,3	-844,5	5109,3	-223,3	-223,3
3,7	-9,82	-5,14	40	10	16,3	-746,7	5029,9	-163,3	-163,3
3,8	-8,15	-3,43	40	10	10,3	-642,8	4940,8	-103,0	-103,0
3,9	-6,75	-1,72	40	5	4,4	-465,6	4774,3	-44,4	-44,4
4	-7,99	0,00	70	10	-0,1	-7,8	4324,2	0,5	0,5
4,1	-9,22	1,72	100	35	0,0	682,1	3644,8	0,0	0,0
4,2	-11,58	3,43	160	30	0,0	997,8	3345,0	0,0	0,0
4,3	-6,87	5,14	85	70	0,0	1858,3	2481,4	0,1	0,1
4,4	-5,17	6,84	70	85	0,0	2474,0	1865,7	-0,3	-0,3
4,5	-0,63	8,53	25	85	0,0	4019,6	300,4	0,0	0,0
4,6	-10,84	10,20	130	115	0,0	2129,5	2260,7	0,0	0,0
4,7	-2,70	11,86	15	165	0,0	3527,9	809,7	0,0	0,0
4,8	-13,11	13,50	180	170	-0,4	2233,0	2202,4	3,9	3,9
4,9	-11,47	15,11	180	170	-5,9	2265,8	2167,1	58,9	58,9
5	-9,81	16,70	180	175	-11,5	2289,0	2137,4	115,4	115,4

Tabla 19. Par mínimo acotado función Parábola con A=0,15

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-20,57	-16,70	40	15	56,6	-1623,8	5716,2	-565,9	-565,9
3,1	-19,98	-15,11	50	15	51,1	-1233,2	5352,5	-511,2	-511,2
3,2	-18,04	-13,50	45	15	45,5	-1246,2	5403,5	-455,0	-455,0
3,3	-15,79	-11,86	35	10	39,9	-1306,0	5499,8	-399,3	-399,3
3,4	-14,18	-10,20	35	10	34,1	-1212,7	5434,3	-340,7	-340,7
3,5	-13,55	-8,53	45	10	28,2	-893,9	5134,5	-281,6	-281,6
3,6	-11,48	-6,84	40	10	22,3	-844,5	5109,3	-223,3	-223,3
3,7	-9,82	-5,14	40	10	16,3	-746,7	5029,9	-163,3	-163,3
3,8	-8,15	-3,43	40	10	10,3	-642,8	4940,8	-103,0	-103,0
3,9	-6,75	-1,72	40	5	4,4	-465,6	4774,3	-44,4	-44,4
4	-6,67	0,00	60	20	-0,1	-16,7	4333,1	1,0	1,0
4,1	-5,85	1,72	65	40	-0,2	953,3	3369,7	1,9	1,9
4,2	-7,24	3,43	85	55	0,0	1394,0	2938,8	0,2	0,2
4,3	-6,87	5,14	85	70	0,0	1858,3	2481,4	0,1	0,1
4,4	-5,17	6,84	70	85	0,0	2474,0	1865,7	-0,3	-0,3
4,5	-4,20	8,53	60	100	-0,1	2893,6	1446,5	1,3	1,3
4,6	-2,78	10,20	40	120	0,0	3400,6	934,5	0,2	0,2
4,7	-1,66	11,86	20	140	-1,7	3653,0	676,5	16,7	16,7
4,8	-0,69	13,50	10	160	-5,9	3639,8	682,7	58,6	58,6
4,9	0,88	15,11	5	170	-11,7	3637,8	669,8	117,3	117,3
5	2,75	16,70	10	165	-18,0	3673,2	612,9	180,0	180,0

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 20. Par máximo función Parábola con A=0,15

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-28,21	-16,70	0	180	89,8	2691,9	1317,5	-897,8	-897,8
3,1	-26,98	-15,11	0	180	85,5	2750,7	1299,6	-854,5	-854,5
3,2	-25,72	-13,50	0	180	81,0	2809,4	1280,0	-810,2	-810,2
3,3	-24,43	-11,86	0	180	76,5	2867,9	1258,7	-764,7	-764,7
3,4	-31,65	-10,20	180	180	71,6	1690,4	2412,9	-716,2	-716,2
3,5	-30,61	-8,53	180	180	67,0	1731,8	2412,0	-670,2	-670,2
3,6	-29,55	-6,84	180	180	62,4	1773,9	2408,5	-623,6	-623,6
3,7	-28,34	-5,14	180	180	57,3	1809,4	2410,1	-573,1	-573,1
3,8	-27,23	-3,43	180	180	52,6	1853,2	2401,0	-525,5	-525,5
3,9	-25,98	-1,72	180	180	47,4	1890,3	2396,3	-474,0	-474,0
4	-24,70	0,00	180	180	42,2	1928,1	2388,3	-422,1	-422,1
4,1	-23,39	1,72	180	170	37,0	1967,8	2375,5	-370,2	-370,2
4,2	-22,05	3,43	180	170	31,8	2008,3	2358,8	-318,3	-318,3
4,3	-20,69	5,14	180	170	26,6	2049,2	2338,5	-266,3	-266,3
4,4	1,81	6,84	40	5	-25,5	60,3	4248,0	255,0	255,0
4,5	3,53	8,53	40	5	-31,3	174,4	4122,2	313,1	313,1
4,6	5,24	10,20	40	5	-37,0	289,9	3991,3	370,5	370,5
4,7	7,52	11,86	35	5	-42,9	397,0	3860,8	429,2	429,2
4,8	9,21	13,50	35	5	-48,5	527,2	3707,7	484,6	484,6
4,9	10,58	15,11	35	0	-54,0	603,5	3608,2	539,6	539,6
5	12,09	16,70	40	5	-59,4	674,6	3509,7	594,0	594,0

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 21. Par mínimo función Parábola con A=0,2

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-27,84	-21,80	55	20	72,3	-1527,2	5450,3	-723,2	-723,2
3,1	-25,70	-19,80	50	15	65,4	-1541,5	5527,4	-653,5	-653,5
3,2	-22,80	-17,74	40	15	58,3	-1713,5	5766,4	-583,3	-583,3
3,3	-22,03	-15,64	50	15	51,1	-1296,0	5387,6	-511,4	-511,4
3,4	-19,16	-13,50	40	10	43,8	-1361,2	5508,6	-437,6	-437,6
3,5	-16,54	-11,31	35	10	36,3	-1328,1	5522,0	-363,5	-363,5
3,6	-15,15	-9,09	40	10	28,8	-1019,3	5245,4	-287,9	-287,9
3,7	-13,00	-6,84	40	10	20,9	-902,5	5160,5	-209,4	-209,4
3,8	-11,57	-4,57	45	10	13,4	-641,8	4923,4	-133,5	-133,5
3,9	-9,35	-2,29	45	10	5,4	-520,3	4822,6	-54,5	-54,5
4	-10,98	0,00	70	5	0,0	0,7	4315,7	-0,1	-0,1
4,1	-15,57	2,29	135	0	0,0	560,8	3779,2	0,2	0,2
4,2	-7,68	4,57	70	55	0,0	1618,8	2720,8	0,4	0,4
4,3	-3,05	6,84	45	60	0,0	2994,9	1335,3	0,0	0,0
4,4	-15,45	9,09	180	60	0,0	1640,8	2769,8	0,2	0,2
4,5	-11,79	11,31	105	100	0,0	2155,7	2249,9	0,4	0,4
4,6	-3,31	13,50	40	115	0,0	3484,4	861,7	-0,2	-0,2
4,7	-4,79	15,64	25	180	0,0	3334,4	1031,8	0,0	0,0
4,8	-17,61	17,74	180	175	0,0	2273,5	2256,8	0,0	0,0
4,9	-15,50	19,80	180	175	-6,7	2320,9	2205,6	66,5	66,5
5	-13,17	21,80	180	170	-13,5	2369,0	2143,7	134,9	134,9

Tabla 22. Par mínimo acotado función Parábola con A=0,2

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-27,84	-21,80	55	20	72,3	-1527,2	5450,3	-723,2	-723,2
3,1	-25,70	-19,80	50	15	65,4	-1541,5	5527,4	-653,5	-653,5
3,2	-22,80	-17,74	40	15	58,3	-1713,5	5766,4	-583,3	-583,3
3,3	-22,03	-15,64	50	15	51,1	-1296,0	5387,6	-511,4	-511,4
3,4	-19,16	-13,50	40	10	43,8	-1361,2	5508,6	-437,6	-437,6
3,5	-16,54	-11,31	35	10	36,3	-1328,1	5522,0	-363,5	-363,5
3,6	-15,15	-9,09	40	10	28,8	-1019,3	5245,4	-287,9	-287,9
3,7	-13,00	-6,84	40	10	20,9	-902,5	5160,5	-209,4	-209,4
3,8	-11,57	-4,57	45	10	13,4	-641,8	4923,4	-133,5	-133,5
3,9	-9,35	-2,29	45	10	5,4	-520,3	4822,6	-54,5	-54,5
4	-6,13	0,00	40	20	0,0	-3,3	4319,7	0,2	0,2
4,1	-6,41	2,29	55	40	0,1	1148,0	3178,1	-0,6	-0,6
4,2	-7,68	4,57	70	55	0,0	1618,8	2720,8	0,4	0,4
4,3	-4,63	6,84	55	65	0,0	2583,1	1754,2	0,3	0,3
4,4	-7,66	9,09	75	85	0,0	2369,9	1992,7	-0,5	-0,5
4,5	-6,38	11,31	65	100	0,2	2798,2	1566,1	-1,9	-1,9
4,6	-5,48	13,50	55	120	-0,1	3089,1	1276,5	1,4	1,4
4,7	-3,21	15,64	35	140	-2,3	3463,4	886,4	23,1	23,1
4,8	-1,12	17,74	15	160	-7,0	3648,6	681,0	69,9	69,9
4,9	1,18	19,80	5	170	-14,7	3683,5	617,5	146,7	146,7
5	3,66	21,80	5	170	-22,9	3713,8	549,7	229,1	229,1

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 23. Par máximo función Parábola con A=0,2

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
3	-35,04	-21,80	0	180	109,1	2398,4	1423,2	-1090,8	-1090,8
3,1	-33,62	-19,80	0	180	104,1	2472,7	1411,3	-1041,4	-1041,4
3,2	-32,14	-17,74	0	180	99,0	2548,4	1396,5	-990,1	-990,1
3,3	-30,76	-15,64	0	180	94,1	2627,2	1374,9	-940,8	-940,8
3,4	-29,19	-13,50	0	180	88,6	2704,2	1354,1	-886,0	-886,0
3,5	-27,57	-11,31	0	180	82,9	2781,7	1329,9	-829,3	-829,3
3,6	-26,06	-9,09	0	180	77,5	2860,3	1300,2	-775,3	-775,3
3,7	-24,35	-6,84	0	180	71,5	2937,1	1269,4	-715,5	-715,5
3,8	-22,59	-4,57	0	180	65,4	3013,0	1235,1	-654,0	-654,0
3,9	-20,78	-2,29	0	180	59,1	3087,5	1197,3	-591,1	-591,1
4	-18,75	0,00	0	180	52,2	3160,2	1156,2	-521,8	-521,8
4,1	-16,85	2,29	5	170	45,7	3234,6	1107,5	-456,7	-456,7
4,2	-14,73	4,57	5	165	38,9	3330,6	1030,6	-389,4	-389,4
4,3	-26,73	6,84	180	170	32,4	2003,1	2437,7	-323,6	-323,6
4,4	3,01	9,09	35	5	-33,0	219,3	4079,1	330,3	330,3
4,5	6,08	11,31	30	5	-40,5	416,8	3854,5	405,1	405,1
4,6	6,97	13,50	40	5	-47,9	459,7	3795,0	479,1	479,1
4,7	9,99	15,64	35	5	-55,2	637,8	3576,2	551,8	551,8
4,8	11,81	17,74	35	0	-62,1	734,6	3444,6	621,5	621,5
4,9	13,80	19,80	40	5	-68,9	849,3	3288,5	688,6	688,6
5	16,86	21,80	30	0	-75,6	1091,3	2985,6	755,9	755,9

Función suelo Montaña

- Parámetro A=0,1

Tabla 24. Par mínimo función montaña con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,03	0,42	20	110	-0,3	3759,4	557,0	2,9	2,9
2,1	0,04	0,59	20	110	-0,4	3761,6	554,8	4,2	4,2
2,2	0,04	0,81	15	130	-0,6	3666,3	650,1	6,0	6,0
2,3	0,07	1,08	15	130	-0,8	3669,2	647,1	8,4	8,4
2,4	0,11	1,42	15	130	-1,1	3673,0	643,3	11,5	11,5
2,5	0,17	1,81	15	130	-1,5	3677,9	638,3	15,4	15,4
2,6	0,20	2,26	10	150	-2,0	3593,1	723,0	20,4	20,4
2,7	0,29	2,75	10	150	-2,6	3598,9	717,0	26,2	26,2
2,8	0,41	3,25	10	150	-3,3	3605,6	709,9	33,1	33,1
2,9	0,58	3,75	10	150	-4,1	3613,3	701,6	41,3	41,3
3	0,73	4,21	5	165	-5,0	3565,7	748,6	50,4	50,4
3,1	0,99	4,58	5	165	-6,1	3573,3	740,2	60,5	60,5
3,2	1,31	4,82	5	165	-7,2	3580,8	731,4	71,7	71,7
3,3	1,68	4,90	5	165	-8,4	3588,0	723,0	83,7	83,7
3,4	0,26	4,79	180	165	-9,3	2208,5	2107,0	93,0	93,0
3,5	0,39	4,45	180	160	-8,9	2212,6	2102,7	89,2	89,2
3,6	0,53	3,90	180	170	-8,2	2203,6	2111,4	82,1	82,1
3,7	0,73	3,14	180	170	-7,2	2204,5	2110,4	71,9	71,9
3,8	0,99	2,20	180	175	-6,0	2195,6	2119,3	59,6	59,6
3,9	3,35	1,13	30	5	-3,9	-189,1	4503,0	39,1	39,1
4	1,93	0,00	20	5	0,0	-17,7	4334,1	-0,3	-0,3
4,1	4,89	-1,13	145	15	0,0	813,1	3507,0	0,0	0,0
4,2	4,38	-2,20	100	55	0,0	1447,9	2874,9	0,1	0,1
4,3	4,72	-3,14	120	70	0,0	1728,1	2598,1	0,0	0,0
4,4	4,88	-3,90	180	80	0,0	1924,6	2404,3	0,0	0,0
4,5	4,39	-4,45	180	140	0,0	2180,6	2148,7	0,0	0,0
4,6	2,92	-4,79	65	125	0,0	2687,1	1638,5	0,0	0,0
4,7	4,89	-4,90	140	145	0,0	2169,4	2162,8	0,0	0,0
4,8	4,77	-4,82	135	160	0,0	2176,9	2154,7	0,0	0,0
4,9	4,57	-4,58	140	165	0,0	2166,7	2163,5	0,0	0,0
5	4,23	-4,21	180	140	0,0	2156,0	2172,1	-0,2	-0,2
5,1	3,83	-3,75	160	170	0,0	2142,4	2183,5	0,1	0,1
5,2	3,27	-3,25	175	170	0,0	2155,6	2167,8	-0,1	-0,1
5,3	2,44	-2,75	180	175	0,6	2156,5	2164,3	-5,9	-5,9
5,4	1,40	-2,26	180	175	1,6	2148,9	2169,6	-16,5	-16,5
5,5	0,28	-1,81	180	170	2,9	2146,6	2170,1	-29,1	-29,1
5,6	-0,86	-1,42	180	170	4,3	2139,5	2176,1	-43,0	-43,0
5,7	-2,27	-1,08	45	10	3,7	-340,1	4654,9	-37,2	-37,2
5,8	-1,82	-0,81	45	10	2,8	-315,9	4631,3	-27,6	-27,6
5,9	-1,43	-0,59	45	10	2,0	-295,2	4611,0	-20,0	-20,0
6	-1,09	-0,42	45	10	1,4	-277,9	4594,0	-14,2	-14,2

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 25. Par mínimo acotado función montaña con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,03	0,42	20	110	-0,3	3759,4	557,0	2,9	2,9
2,1	0,04	0,59	20	110	-0,4	3761,6	554,8	4,2	4,2
2,2	0,04	0,81	15	130	-0,6	3666,3	650,1	6,0	6,0
2,3	0,07	1,08	15	130	-0,8	3669,2	647,1	8,4	8,4
2,4	0,11	1,42	15	130	-1,1	3673,0	643,3	11,5	11,5
2,5	0,17	1,81	15	130	-1,5	3677,9	638,3	15,4	15,4
2,6	0,20	2,26	10	150	-2,0	3593,1	723,0	20,4	20,4
2,7	0,29	2,75	10	150	-2,6	3598,9	717,0	26,2	26,2
2,8	0,41	3,25	10	150	-3,3	3605,6	709,9	33,1	33,1
2,9	0,58	3,75	10	150	-4,1	3613,3	701,6	41,3	41,3
3	0,73	4,21	5	165	-5,0	3565,7	748,6	50,4	50,4
3,1	0,99	4,58	5	165	-6,1	3573,3	740,2	60,5	60,5
3,2	1,31	4,82	5	165	-7,2	3580,8	731,4	71,7	71,7
3,3	1,68	4,90	5	165	-8,4	3588,0	723,0	83,7	83,7
3,4	2,07	4,79	5	180	-9,7	3516,6	793,2	96,9	96,9
3,5	2,38	4,45	25	175	-10,7	3323,3	986,1	107,5	107,5
3,6	2,40	3,90	45	180	-10,8	2965,2	1345,1	108,0	108,0
3,7	2,34	3,14	65	180	-10,0	2674,9	1636,7	99,6	99,6
3,8	2,24	2,20	85	180	-8,4	2463,8	1849,3	83,7	83,7
3,9	2,18	1,13	105	180	-6,4	2322,8	1992,0	64,0	64,0
4	2,24	0,00	125	180	-4,4	2227,8	2088,6	43,7	43,7
4,1	2,39	-1,13	145	180	-2,4	2180,7	2137,5	24,3	24,3
4,2	2,67	-2,20	165	180	-0,9	2168,6	2151,6	9,2	9,2
4,3	3,18	-3,14	175	180	-0,1	2163,7	2159,3	0,8	0,8
4,4	3,84	-3,90	165	160	0,0	2175,0	2151,3	-0,2	-0,2
4,5	4,39	-4,45	180	140	0,0	2180,6	2148,7	0,0	0,0
4,6	4,78	-4,79	160	140	0,0	2163,8	2167,7	-0,2	-0,2
4,7	4,89	-4,90	140	145	0,0	2169,4	2162,8	0,0	0,0
4,8	4,77	-4,82	135	160	0,0	2176,9	2154,7	0,0	0,0
4,9	4,57	-4,58	140	165	0,0	2166,7	2163,5	0,0	0,0
5	4,28	-4,21	160	155	0,0	2150,6	2177,6	0,3	0,3
5,1	3,83	-3,75	160	170	0,0	2142,4	2183,5	0,1	0,1
5,2	3,27	-3,25	175	170	0,0	2155,6	2167,8	-0,1	-0,1
5,3	2,44	-2,75	180	175	0,6	2156,5	2164,3	-5,9	-5,9
5,4	1,40	-2,26	180	175	1,6	2148,9	2169,6	-16,5	-16,5
5,5	0,28	-1,81	180	170	2,9	2146,6	2170,1	-29,1	-29,1
5,6	-0,86	-1,42	180	170	4,3	2139,5	2176,1	-43,0	-43,0
5,7	-1,86	-1,08	175	180	5,5	2125,7	2189,3	-55,2	-55,2
5,8	-2,85	-0,81	170	180	6,8	2117,9	2197,0	-68,2	-68,2
5,9	-3,67	-0,59	170	180	7,9	2114,6	2200,4	-79,1	-79,1
6	-4,30	-0,42	170	180	8,7	2113,0	2202,2	-87,3	-87,3

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 26. Par máximo función montaña con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,16	0,42	35	5	-1,6	-270,3	4586,6	16,4	16,4
2,1	0,23	0,59	35	5	-2,3	-262,9	4579,2	23,0	23,0
2,2	0,34	0,81	35	5	-3,1	-252,9	4569,2	31,5	31,5
2,3	0,48	1,08	35	5	-4,2	-239,9	4555,9	42,0	42,0
2,4	0,67	1,42	35	5	-5,5	-223,2	4538,9	54,8	54,8
2,5	0,91	1,81	35	5	-7,0	-202,4	4517,7	69,8	69,8
2,6	1,21	2,26	35	5	-8,7	-177,4	4492,0	86,7	86,7
2,7	1,57	2,75	35	5	-10,5	-148,2	4461,8	105,0	105,0
2,8	1,99	3,25	35	5	-12,4	-115,5	4427,7	123,8	123,8
2,9	2,45	3,75	35	5	-14,2	-80,4	4390,8	142,2	142,2
3	2,95	4,21	35	5	-15,9	-44,6	4352,8	158,9	158,9
3,1	3,46	4,58	35	5	-17,2	-10,4	4316,4	172,4	172,4
3,2	3,94	4,82	35	5	-18,1	19,4	4284,5	181,3	181,3
3,3	4,37	4,90	35	5	-18,4	41,8	4260,5	184,2	184,2
3,4	4,89	4,79	10	15	-18,3	3581,4	719,6	183,2	183,2
3,5	4,90	4,45	20	35	-18,4	4327,9	-25,8	184,3	184,3
3,6	4,90	3,90	25	50	-18,5	4343,2	-39,4	184,8	184,8
3,7	4,90	3,14	25	65	-18,4	4291,5	14,8	184,2	184,2
3,8	4,88	2,20	25	75	-18,1	4175,4	134,0	180,5	180,5
3,9	4,82	1,13	25	85	-17,3	4049,1	263,7	173,2	173,2
4	4,83	0,00	20	105	-16,5	3905,1	411,3	164,8	164,8
4,1	4,84	-1,13	15	130	-15,2	3741,7	578,3	152,4	152,4
4,2	4,76	-2,20	10	150	-13,8	3631,8	691,5	137,6	137,6
4,3	-0,56	-3,14	35	5	13,0	-522,8	4838,1	-130,0	-130,0
4,4	-1,48	-3,90	40	10	15,7	-502,8	4815,4	-157,5	-157,5
4,5	-2,51	-4,45	40	10	17,7	-562,2	4871,2	-177,1	-177,1
4,6	-3,40	-4,79	40	10	18,7	-609,2	4914,9	-187,4	-187,4
4,7	-3,70	-4,90	50	10	18,9	-452,0	4756,5	-189,2	-189,2
4,8	-3,97	-4,82	60	10	18,4	-284,5	4588,3	-183,6	-183,6
4,9	-4,89	-4,58	20	35	18,1	3368,8	932,9	-181,3	-181,3
5	-4,90	-4,21	25	50	18,0	3595,8	707,1	-180,0	-180,0
5,1	-4,90	-3,75	25	65	17,9	3728,1	576,2	-178,6	-178,6
5,2	-4,90	-3,25	25	75	17,6	3714,2	591,7	-175,8	-175,8
5,3	-4,89	-2,75	25	90	17,1	3638,4	669,2	-171,5	-171,5
5,4	-4,89	-2,26	20	110	16,8	3601,3	707,9	-167,8	-167,8
5,5	-4,88	-1,81	15	130	16,3	3537,6	773,0	-163,0	-163,0
5,6	-4,83	-1,42	10	150	15,7	3475,3	836,6	-157,0	-157,0
5,7	-4,67	-1,08	5	165	14,9	3444,7	868,4	-148,7	-148,7
5,8	-4,34	-0,81	5	165	13,7	3454,6	859,5	-136,8	-136,8
5,9	-3,94	-0,59	0	180	12,2	3424,6	890,3	-122,5	-122,5
6	-3,46	-0,42	0	180	10,7	3433,6	881,8	-106,9	-106,9

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

- Parámetro A=0,15

Tabla 27. Par mínimo función montaña con A=0,15

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,04	0,63	20	110	-0,4	3761,8	554,6	4,3	4,3
2,1	0,06	0,88	20	110	-0,6	3765,1	551,3	6,3	6,3
2,2	0,07	1,21	15	130	-0,9	3669,9	646,5	9,0	9,0
2,3	0,11	1,62	15	130	-1,3	3674,3	642,0	12,5	12,5
2,4	0,17	2,13	15	130	-1,7	3680,0	636,1	17,1	17,1
2,5	0,25	2,72	15	130	-2,3	3687,4	628,6	23,0	23,0
2,6	0,37	3,39	15	130	-3,0	3696,5	619,1	30,3	30,3
2,7	0,44	4,12	10	145	-3,9	3634,1	681,1	38,6	38,6
2,8	0,64	4,88	10	145	-4,9	3644,4	669,9	48,8	48,8
2,9	0,89	5,62	10	145	-6,1	3656,1	657,0	60,8	60,8
3	1,10	6,30	5	165	-7,4	3585,8	726,0	74,5	74,5
3,1	1,48	6,85	5	165	-8,9	3596,8	712,9	89,4	89,4
3,2	1,96	7,21	5	165	-10,6	3607,6	699,5	106,0	106,0
3,3	2,52	7,33	5	165	-12,4	3617,6	686,7	123,9	123,9
3,4	0,39	7,16	180	165	-13,8	2226,1	2088,5	138,2	138,2
3,5	0,56	6,66	180	165	-13,2	2229,9	2084,0	132,3	132,3
3,6	0,79	5,84	180	170	-12,2	2222,5	2090,9	122,0	122,0
3,7	1,10	4,70	180	175	-10,7	2213,6	2099,4	107,4	107,4
3,8	1,48	3,30	180	180	-8,9	2203,5	2109,7	89,2	89,2
3,9	5,32	1,70	35	5	-6,0	-126,1	4436,6	60,1	60,1
4	5,36	0,00	55	10	0,0	0,0	4316,4	0,0	0,0
4,1	5,21	-1,70	70	40	0,0	1063,5	3258,7	-0,1	-0,1
4,2	7,12	-3,30	125	50	0,0	1372,4	2959,4	-0,2	-0,2
4,3	7,03	-4,70	120	70	0,0	1745,1	2593,1	0,5	0,5
4,4	5,82	-5,84	150	180	0,0	2173,3	2165,5	0,0	0,0
4,5	6,57	-6,66	175	145	0,0	2188,6	2156,8	0,0	0,0
4,6	7,10	-7,16	150	160	0,0	2183,5	2166,5	0,0	0,0
4,7	7,32	-7,33	150	160	0,0	2178,2	2173,8	0,0	0,0
4,8	7,07	-7,21	125	175	0,0	2196,4	2153,8	0,0	0,0
4,9	6,93	-6,85	170	145	0,0	2161,0	2186,8	0,0	0,0
5	6,40	-6,30	160	160	0,0	2153,7	2189,3	0,0	0,0
5,1	5,73	-5,62	165	170	0,0	2147,9	2189,7	0,1	0,1
5,2	4,90	-4,88	180	180	0,0	2160,7	2171,4	0,0	0,0
5,3	3,53	-4,12	180	175	1,2	2153,5	2172,5	-11,7	-11,7
5,4	1,96	-3,39	180	170	2,8	2145,1	2175,7	-27,6	-27,6
5,5	0,41	-2,72	180	180	4,4	2133,1	2184,0	-44,0	-44,0
5,6	-1,30	-2,13	180	170	6,5	2129,2	2185,4	-64,6	-64,6
5,7	-3,41	-1,62	45	10	5,5	-396,1	4708,9	-55,0	-55,0
5,8	-2,74	-1,21	45	10	4,1	-360,3	4674,6	-40,9	-40,9
5,9	-2,14	-0,88	45	10	3,0	-329,5	4644,7	-29,7	-29,7
6	-1,64	-0,63	45	10	2,1	-303,8	4619,6	-21,0	-21,0

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 28. Par mínimo acotado función montaña con A=0,15

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,04	0,63	20	110	-0,4	3761,8	554,6	4,3	4,3
2,1	0,06	0,88	20	110	-0,6	3765,1	551,3	6,3	6,3
2,2	0,07	1,21	15	130	-0,9	3669,9	646,5	9,0	9,0
2,3	0,11	1,62	15	130	-1,3	3674,3	642,0	12,5	12,5
2,4	0,17	2,13	15	130	-1,7	3680,0	636,1	17,1	17,1
2,5	0,25	2,72	15	130	-2,3	3687,4	628,6	23,0	23,0
2,6	0,37	3,39	15	130	-3,0	3696,5	619,1	30,3	30,3
2,7	0,44	4,12	10	145	-3,9	3634,1	681,1	38,6	38,6
2,8	0,64	4,88	10	145	-4,9	3644,4	669,9	48,8	48,8
2,9	0,89	5,62	10	145	-6,1	3656,1	657,0	60,8	60,8
3	1,10	6,30	5	165	-7,4	3585,8	726,0	74,5	74,5
3,1	1,48	6,85	5	165	-8,9	3596,8	712,9	89,4	89,4
3,2	1,96	7,21	5	165	-10,6	3607,6	699,5	106,0	106,0
3,3	2,52	7,33	5	165	-12,4	3617,6	686,7	123,9	123,9
3,4	2,82	7,16	25	180	-14,3	3325,4	977,7	143,4	143,4
3,5	2,91	6,66	45	180	-15,2	3007,2	1296,4	152,1	152,1
3,6	2,83	5,84	65	180	-14,8	2718,0	1587,6	148,3	148,3
3,7	2,69	4,70	85	180	-13,3	2503,9	1804,2	133,0	133,0
3,8	2,67	3,30	105	180	-11,1	2349,8	1960,8	111,2	111,2
3,9	2,70	1,70	125	180	-8,4	2257,1	2056,2	83,7	83,7
4	2,89	0,00	145	180	-5,6	2203,5	2112,9	55,7	55,7
4,1	3,34	-1,70	165	180	-3,2	2177,2	2142,9	31,6	31,6
4,2	4,00	-3,30	175	180	-1,4	2177,0	2148,1	14,2	14,2
4,3	4,76	-4,70	180	180	-0,2	2178,7	2152,4	2,1	2,1
4,4	5,76	-5,84	170	160	0,0	2185,7	2152,9	0,1	0,1
4,5	6,57	-6,66	175	145	0,0	2188,6	2156,8	0,0	0,0
4,6	7,07	-7,16	180	140	0,0	2187,4	2162,5	-0,1	-0,1
4,7	7,24	-7,33	180	160	0,0	2190,1	2161,5	0,1	0,1
4,8	7,28	-7,21	165	150	0,0	2165,2	2186,0	-0,1	-0,1
4,9	6,93	-6,85	170	145	0,0	2161,0	2186,8	0,0	0,0
5	6,40	-6,30	160	160	0,0	2153,7	2189,3	0,0	0,0
5,1	5,73	-5,62	165	170	0,0	2147,9	2189,7	0,1	0,1
5,2	4,90	-4,88	180	180	0,0	2160,7	2171,4	0,0	0,0
5,3	3,53	-4,12	180	175	1,2	2153,5	2172,5	-11,7	-11,7
5,4	1,96	-3,39	180	170	2,8	2145,1	2175,7	-27,6	-27,6
5,5	0,41	-2,72	180	180	4,4	2133,1	2184,0	-44,0	-44,0
5,6	-1,30	-2,13	180	170	6,5	2129,2	2185,4	-64,6	-64,6
5,7	-2,93	-1,62	170	180	8,5	2098,9	2214,4	-85,0	-85,0
5,8	-4,27	-1,21	175	180	10,2	2104,0	2209,0	-101,8	-101,8
5,9	-5,50	-0,88	170	180	11,8	2094,4	2218,8	-117,7	-117,7
6	-6,36	-0,63	180	180	12,9	2110,9	2202,9	-129,4	-129,4

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 29. Par máximo función montaña con A=0,15

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,24	0,63	35	5	-2,5	-262,0	4578,3	24,6	24,6
2,1	0,35	0,88	35	5	-3,4	-250,9	4567,0	34,4	34,4
2,2	0,51	1,21	35	5	-4,7	-235,8	4551,8	47,1	47,1
2,3	0,72	1,62	35	5	-6,3	-216,1	4531,7	62,9	62,9
2,4	1,01	2,13	35	5	-8,2	-190,7	4505,7	81,9	81,9
2,5	1,37	2,72	35	5	-10,4	-159,1	4473,1	104,1	104,1
2,6	1,81	3,39	35	5	-12,9	-121,0	4433,3	129,1	129,1
2,7	2,35	4,12	35	5	-15,6	-76,4	4386,5	156,1	156,1
2,8	2,98	4,88	35	5	-18,4	-26,4	4333,2	183,9	183,9
2,9	3,67	5,62	35	5	-21,1	27,4	4275,4	210,9	210,9
3	4,42	6,30	35	5	-23,5	82,2	4215,9	235,5	235,5
3,1	5,18	6,85	35	5	-25,5	134,4	4158,7	255,5	255,5
3,2	5,90	7,21	35	5	-26,9	179,6	4108,8	268,9	268,9
3,3	6,39	7,33	40	5	-27,4	157,7	4127,9	274,1	274,1
3,4	7,31	7,16	10	15	-27,4	3891,2	390,9	274,0	274,0
3,5	7,33	6,66	20	35	-27,7	4578,6	-294,3	276,9	276,9
3,6	7,33	5,84	25	50	-27,8	4505,6	-217,3	278,3	278,3
3,7	7,30	4,70	25	60	-27,8	4462,7	-168,9	278,3	278,3
3,8	7,30	3,30	25	75	-27,3	4268,2	32,4	273,3	273,3
3,9	7,19	1,70	25	85	-26,2	4130,0	178,3	262,3	262,3
4	7,20	0,00	20	105	-24,9	3959,3	357,1	249,2	249,2
4,1	7,24	-1,70	15	130	-23,1	3777,0	547,5	230,7	230,7
4,2	7,05	-3,30	10	145	-20,8	3680,4	651,4	208,0	208,0
4,3	-1,13	-4,70	35	10	19,7	-640,1	4953,0	-197,0	-197,0
4,4	-2,50	-5,84	35	5	23,9	-666,6	4973,4	-239,1	-239,1
4,5	-3,38	-6,66	45	10	26,8	-621,4	4923,0	-268,4	-268,4
4,6	-4,77	-7,16	45	10	28,3	-685,2	4979,2	-283,3	-283,3
4,7	-5,25	-7,33	55	10	28,5	-498,0	4789,1	-284,5	-284,5
4,8	-5,68	-7,21	65	10	27,5	-315,7	4605,2	-275,2	-275,2
4,9	-7,31	-6,85	20	35	27,0	3116,5	1167,1	-269,8	-269,8
5	-7,33	-6,30	25	50	26,7	3393,4	892,8	-267,2	-267,2
5,1	-7,33	-5,62	25	65	26,5	3573,4	715,9	-264,7	-264,7
5,2	-7,32	-4,88	25	75	26,0	3583,5	709,5	-260,0	-260,0
5,3	-7,31	-4,12	25	90	25,3	3531,0	765,6	-253,5	-253,5
5,4	-7,31	-3,39	20	110	24,8	3517,7	782,4	-248,2	-248,2
5,5	-7,30	-2,72	15	130	24,1	3470,5	832,9	-241,3	-241,3
5,6	-7,20	-2,13	10	145	23,3	3440,9	865,4	-232,8	-232,8
5,7	-6,99	-1,62	5	165	22,0	3399,6	909,3	-220,5	-220,5
5,8	-6,54	-1,21	5	170	20,3	3391,7	919,5	-203,5	-203,5
5,9	-5,90	-0,88	5	170	18,3	3407,7	905,3	-182,7	-182,7
6	-5,18	-0,63	0	180	15,9	3408,2	906,1	-159,1	-159,1

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

- Parámetro A=0,2

Tabla 30. Par mínimo función montaña con A=0,2

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,05	0,84	20	110	-0,6	3764,1	552,2	5,8	5,8
2,1	0,08	1,18	20	110	-0,8	3768,5	547,8	8,4	8,4
2,2	0,09	1,62	15	130	-1,2	3673,5	642,8	11,9	11,9
2,3	0,14	2,16	15	130	-1,7	3679,4	636,8	16,6	16,6
2,4	0,22	2,83	15	130	-2,3	3687,0	629,0	22,6	22,6
2,5	0,33	3,62	15	130	-3,0	3696,8	618,8	30,3	30,3
2,6	0,40	4,51	10	145	-4,0	3635,3	679,9	39,6	39,6
2,7	0,59	5,48	10	145	-5,1	3647,1	667,2	50,8	50,8
2,8	0,85	6,49	10	145	-6,4	3660,7	652,1	64,2	64,2
2,9	1,09	7,47	10	155	-8,0	3621,4	689,6	79,7	79,7
3	1,51	8,37	10	155	-9,7	3637,0	671,1	97,2	97,2
3,1	1,98	9,10	5	165	-11,7	3619,8	684,8	117,4	117,4
3,2	2,55	9,58	5	170	-13,9	3606,7	693,7	139,0	139,0
3,3	3,36	9,73	5	165	-16,3	3645,6	649,3	163,0	163,0
3,4	1,60	9,51	85	175	-18,2	2548,7	1757,7	181,9	181,9
3,5	0,75	8,85	180	165	-17,4	2251,0	2061,0	174,3	174,3
3,6	1,06	7,76	180	170	-16,1	2243,5	2067,5	161,1	161,1
3,7	1,46	6,26	180	175	-14,2	2233,4	2077,0	142,1	142,1
3,8	2,02	4,39	180	170	-11,9	2234,6	2075,9	119,2	119,2
3,9	7,45	2,27	40	5	-8,4	-39,2	4344,5	83,8	83,8
4	5,39	0,00	40	15	0,0	-7,2	4323,6	-0,3	-0,3
4,1	9,73	-2,27	155	5	0,0	821,7	3509,2	0,0	0,0
4,2	8,54	-4,39	100	55	0,0	1480,3	2860,9	0,3	0,3
4,3	9,68	-6,26	145	65	-0,1	1717,7	2638,8	0,5	0,5
4,4	5,98	-7,76	70	90	0,0	2453,4	1893,7	0,0	0,0
4,5	8,72	-8,85	170	150	0,0	2200,4	2167,3	0,1	0,1
4,6	9,39	-9,51	150	165	0,0	2200,8	2175,0	0,0	0,0
4,7	9,73	-9,73	145	150	0,0	2190,6	2188,8	0,0	0,0
4,8	9,29	-9,58	120	180	0,0	2220,0	2155,6	-0,1	-0,1
4,9	9,15	-9,10	180	140	0,0	2181,2	2190,5	0,2	0,2
5	8,51	-8,37	155	170	0,0	2164,3	2199,3	0,0	0,0
5,1	7,62	-7,47	160	180	0,0	2155,6	2198,5	0,0	0,0
5,2	6,37	-6,49	180	175	0,2	2171,6	2172,1	-2,2	-2,2
5,3	4,53	-5,48	180	170	1,9	2158,0	2174,7	-18,7	-18,7
5,4	2,42	-4,51	180	170	4,1	2138,3	2185,2	-40,9	-40,9
5,5	0,36	-3,62	180	175	6,3	2125,3	2192,0	-62,7	-62,7
5,6	-1,92	-2,83	180	170	9,0	2110,3	2202,5	-89,9	-89,9
5,7	-4,14	-2,16	35	5	7,3	-513,7	4824,2	-72,7	-72,7
5,8	-3,64	-1,62	45	10	5,4	-404,3	4716,8	-53,7	-53,7
5,9	-2,86	-1,18	45	10	3,9	-363,6	4677,8	-39,1	-39,1
6	-2,18	-0,84	45	10	2,8	-329,6	4644,8	-27,8	-27,8

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 31. Par mínimo acotado función montaña con A=0,2

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,05	0,84	20	110	-0,6	3764,1	552,2	5,8	5,8
2,1	0,08	1,18	20	110	-0,8	3768,5	547,8	8,4	8,4
2,2	0,09	1,62	15	130	-1,2	3673,5	642,8	11,9	11,9
2,3	0,14	2,16	15	130	-1,7	3679,4	636,8	16,6	16,6
2,4	0,22	2,83	15	130	-2,3	3687,0	629,0	22,6	22,6
2,5	0,33	3,62	15	130	-3,0	3696,8	618,8	30,3	30,3
2,6	0,40	4,51	10	145	-4,0	3635,3	679,9	39,6	39,6
2,7	0,59	5,48	10	145	-5,1	3647,1	667,2	50,8	50,8
2,8	0,85	6,49	10	145	-6,4	3660,7	652,1	64,2	64,2
2,9	1,09	7,47	10	155	-8,0	3621,4	689,6	79,7	79,7
3	1,51	8,37	10	155	-9,7	3637,0	671,1	97,2	97,2
3,1	1,98	9,10	5	165	-11,7	3619,8	684,8	117,4	117,4
3,2	2,55	9,58	5	170	-13,9	3606,7	693,7	139,0	139,0
3,3	3,36	9,73	5	165	-16,3	3645,6	649,3	163,0	163,0
3,4	3,76	9,51	25	180	-18,8	3365,5	927,4	188,4	188,4
3,5	3,88	8,85	45	180	-20,0	3053,6	1240,3	200,1	200,1
3,6	3,77	7,76	65	180	-19,5	2763,9	1533,3	195,5	195,5
3,7	3,66	6,26	85	180	-17,8	2538,1	1763,3	177,8	177,8
3,8	3,55	4,39	105	180	-14,8	2385,0	1921,1	147,9	147,9
3,9	3,59	2,27	125	180	-11,2	2285,1	2025,9	111,9	111,9
4	3,93	0,00	145	180	-7,6	2216,7	2099,7	76,1	76,1
4,1	4,53	-2,27	165	180	-4,4	2184,3	2138,8	44,0	44,0
4,2	5,41	-4,39	175	180	-2,1	2181,2	2150,9	20,5	20,5
4,3	6,42	-6,26	175	180	-0,4	2180,2	2162,7	4,0	4,0
4,4	7,66	-7,76	170	165	0,0	2190,8	2165,0	-0,3	-0,3
4,5	8,72	-8,85	170	150	0,0	2200,4	2167,3	0,1	0,1
4,6	9,39	-9,51	150	165	0,0	2200,8	2175,0	0,0	0,0
4,7	9,73	-9,73	145	150	0,0	2190,6	2188,8	0,0	0,0
4,8	9,66	-9,58	150	170	0,0	2179,9	2198,0	0,1	0,1
4,9	9,15	-9,10	145	170	0,0	2178,1	2193,6	-0,3	-0,3
5	8,51	-8,37	155	170	0,0	2164,3	2199,3	0,0	0,0
5,1	7,62	-7,47	160	180	0,0	2155,6	2198,5	0,0	0,0
5,2	6,37	-6,49	180	175	0,2	2171,6	2172,1	-2,2	-2,2
5,3	4,53	-5,48	180	170	1,9	2158,0	2174,7	-18,7	-18,7
5,4	2,42	-4,51	180	170	4,1	2138,3	2185,2	-40,9	-40,9
5,5	0,36	-3,62	180	175	6,3	2125,3	2192,0	-62,7	-62,7
5,6	-1,92	-2,83	180	170	9,0	2110,3	2202,5	-89,9	-89,9
5,7	-3,90	-2,16	170	180	11,3	2084,9	2226,0	-113,1	-113,1
5,8	-5,68	-1,62	180	180	13,5	2095,2	2215,1	-135,3	-135,3
5,9	-7,31	-1,18	170	180	15,6	2073,6	2237,2	-155,6	-155,6
6	-8,45	-0,84	180	180	17,1	2090,2	2221,5	-170,9	-170,9

Tabla 32. Par máximo función montaña con A=0,2

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,31	0,84	35	5	-3,3	-253,6	4569,9	32,8	32,8
2,1	0,47	1,18	35	5	-4,6	-238,7	4554,8	45,9	45,9
2,2	0,68	1,62	35	5	-6,3	-218,6	4534,3	62,6	62,6
2,3	0,96	2,16	35	5	-8,4	-192,0	4507,0	83,5	83,5
2,4	1,34	2,83	35	5	-10,9	-157,8	4471,7	108,7	108,7
2,5	1,82	3,62	35	5	-13,8	-115,1	4427,2	138,1	138,1
2,6	2,42	4,51	35	5	-17,1	-63,5	4372,7	170,9	170,9
2,7	3,13	5,48	35	5	-20,6	-3,1	4308,2	206,3	206,3
2,8	3,97	6,49	35	5	-24,3	64,8	4234,7	242,6	242,6
2,9	4,89	7,47	35	5	-27,8	137,7	4154,7	277,8	277,8
3	5,88	8,37	35	5	-31,0	211,8	4072,3	309,7	309,7
3,1	6,89	9,10	35	5	-33,6	282,0	3993,2	336,0	336,0
3,2	7,85	9,58	35	5	-35,4	342,6	3924,4	354,0	354,0
3,3	8,94	9,73	30	5	-36,2	390,4	3868,9	362,2	362,2
3,4	9,70	9,51	10	15	-36,4	4186,9	69,0	363,7	363,7
3,5	9,73	8,85	20	35	-36,9	4787,9	-528,0	368,7	368,7
3,6	9,73	7,76	25	50	-37,2	4685,7	-418,9	372,2	372,2
3,7	9,70	6,26	25	60	-37,3	4580,8	-304,3	373,0	373,0
3,8	9,67	4,39	25	75	-36,7	4366,1	-77,6	366,9	366,9
3,9	9,55	2,27	25	85	-35,3	4197,9	104,3	352,9	352,9
4	9,57	0,00	20	105	-33,5	4005,0	311,4	335,1	335,1
4,1	9,58	-2,27	15	130	-30,9	3809,9	520,9	309,0	309,0
4,2	9,31	-4,39	10	145	-27,7	3704,4	639,1	277,4	277,4
4,3	-0,92	-6,26	40	10	26,7	-667,0	4979,6	-266,9	-266,9
4,4	-3,70	-7,76	35	10	32,2	-848,3	5145,8	-322,0	-322,0
4,5	-3,98	-8,85	50	10	36,0	-632,5	4925,8	-359,7	-359,7
4,6	-5,90	-9,51	50	10	37,9	-709,6	4989,2	-379,1	-379,1
4,7	-6,57	-9,73	60	10	37,9	-508,4	4782,8	-379,2	-379,2
4,8	-8,11	-9,58	60	15	36,6	-557,6	4823,0	-366,3	-366,3
4,9	-9,71	-9,10	20	35	35,7	2837,2	1421,2	-356,5	-356,5
5	-9,69	-8,37	25	55	35,2	3294,2	969,0	-352,3	-352,3
5,1	-9,73	-7,47	25	65	34,8	3415,7	853,0	-348,1	-348,1
5,2	-9,72	-6,49	25	75	34,1	3449,2	825,7	-341,4	-341,4
5,3	-9,70	-5,48	20	105	33,3	3429,5	852,0	-332,9	-332,9
5,4	-9,71	-4,51	20	110	32,6	3430,4	857,2	-325,9	-325,9
5,5	-9,69	-3,62	15	130	31,7	3399,8	893,5	-316,9	-316,9
5,6	-9,57	-2,83	10	145	30,6	3382,4	916,2	-306,0	-306,0
5,7	-9,28	-2,16	5	165	29,0	3351,7	951,5	-290,2	-290,2
5,8	-8,69	-1,62	5	170	26,8	3350,5	956,7	-268,1	-268,1
5,9	-7,85	-1,18	5	170	24,1	3373,0	937,3	-241,1	-241,1
6	-6,89	-0,84	5	170	21,1	3394,8	917,8	-211,1	-211,1

Función suelo Seno

- Parámetro A=0,1

Tabla 33. Par mínimo función seno con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,72	-3,33	30	155	0,0	3554,4	763,6	0,2	0,2
2,1	20,86	-11,73	100	50	0,0	1629,4	2853,4	0,0	0,0
2,2	13,75	-17,97	90	105	0,2	2526,3	1957,9	-2,0	-2,0
2,3	13,48	-21,30	70	150	-0,1	2750,9	1761,7	0,6	0,6
2,4	21,33	-21,49	100	100	0,0	2325,2	2311,3	-0,5	-0,5
2,5	21,54	-18,55	120	95	0,1	2129,8	2463,3	-1,0	-1,0
2,6	20,65	-12,64	145	70	0,0	1721,1	2773,2	0,0	0,0
2,7	4,52	-4,44	150	175	-0,1	2156,6	2173,0	0,7	0,7
2,8	-3,63	4,64	55	120	0,2	2452,2	1875,3	-1,7	-1,7
2,9	-12,87	12,80	35	35	0,0	2210,3	2216,7	-0,5	-0,5
3	-18,26	18,65	55	55	0,0	2297,8	2252,5	0,2	0,2
3,1	-20,34	21,52	75	95	0,0	2373,7	2247,4	-0,2	-0,2
3,2	-14,20	21,26	60	160	0,0	2696,0	1827,1	0,5	0,5
3,3	-20,09	17,86	115	90	0,1	2156,2	2407,4	-1,2	-1,2
3,4	-13,67	11,57	180	90	0,1	2032,6	2389,9	-0,7	-0,7
3,5	-4,15	3,13	120	55	0,1	1874,2	2450,7	-0,9	-0,9
3,6	2,60	-5,93	70	115	0,0	3004,5	1322,1	-0,3	-0,3
3,7	7,61	-13,83	75	120	0,1	2818,7	1567,8	-0,8	-0,8
3,8	13,97	-19,26	85	115	-0,3	2607,3	1892,3	2,7	2,7
3,9	19,34	-21,68	95	105	0,0	2429,4	2178,3	-0,1	-0,1
4	20,33	-20,96	85	95	0,1	2337,0	2275,6	-0,9	-0,9
4,1	21,16	-17,11	135	90	0,0	2050,3	2515,8	-0,1	-0,1
4,2	10,26	-10,44	135	145	0,0	2211,5	2176,3	-0,1	-0,1
4,3	-20,85	-1,80	70	20	0,0	-415,0	4706,5	-0,1	-0,1
4,4	-10,54	7,20	75	90	0,0	1777,8	2589,0	-0,4	-0,4
4,5	-3,30	14,79	20	25	0,0	3548,1	800,7	0,0	0,0
4,6	-16,77	19,81	55	55	0,0	2454,3	2090,1	0,1	0,1
4,7	-13,51	21,77	50	160	0,1	2775,4	1742,2	-1,2	-1,2
4,8	-14,98	20,59	70	150	0,0	2608,9	1918,6	0,2	0,2
4,9	-8,45	16,30	75	75	0,0	2894,9	1513,9	-0,2	-0,2
5	-8,64	9,27	115	165	0,0	2258,7	2110,9	0,4	0,4

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 34. Par mínimo acotado a 20 grados función seno con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,72	-3,33	30	155	0,0	3554,4	763,6	0,2	0,2
2,1	4,30	-11,73	45	160	-0,1	3188,5	1161,3	1,4	1,4
2,2	8,46	-17,97	50	175	1,0	2950,3	1468,3	-9,8	-9,8
2,3	12,87	-21,30	65	160	0,2	2784,3	1719,1	-2,3	-2,3
2,4	16,51	-21,49	85	140	-0,3	2576,8	1984,0	2,8	2,8
2,5	16,29	-18,55	105	135	0,7	2380,6	2142,3	-7,3	-7,3
2,6	12,01	-12,64	125	145	0,3	2250,4	2167,8	-3,2	-3,2
2,7	7,54	-4,44	145	165	-6,0	2179,9	2158,7	59,8	59,8
2,8	9,38	4,64	165	180	-26,4	2165,8	2122,0	264,5	264,5
2,9	15,87	12,80	170	180	-53,6	2153,1	2030,3	536,3	536,3
3	20,11	18,65	180	180	-71,7	2136,2	1936,0	717,4	717,4
3,1	21,55	21,52	160	160	-79,2	2109,3	1905,8	792,3	792,3
3,2	12,66	21,26	140	140	-62,7	2120,9	2019,4	627,5	627,5
3,3	-9,41	17,86	120	120	-16,9	2193,3	2236,2	168,9	168,9
3,4	-11,81	11,57	130	125	0,2	2191,3	2216,5	-2,0	-2,0
3,5	-8,04	3,13	150	145	9,2	2158,5	2174,5	-92,2	-92,2
3,6	-9,86	-5,93	170	165	29,5	2107,4	2170,6	-295,5	-295,5
3,7	-16,22	-13,83	170	180	55,8	2003,2	2166,6	-557,9	-557,9
3,8	-20,55	-19,26	170	180	73,4	1923,7	2135,1	-733,6	-733,6
3,9	-20,78	-21,68	150	160	78,2	1919,4	2104,1	-782,3	-782,3
4	-4,35	-20,96	130	140	48,1	2108,7	2147,5	-480,7	-480,7
4,1	15,97	-17,11	115	130	0,6	2306,1	2196,4	-6,2	-6,2
4,2	10,26	-10,44	135	145	0,0	2211,5	2176,3	-0,1	-0,1
4,3	7,08	-1,80	155	165	-10,0	2173,6	2151,2	100,5	100,5
4,4	11,00	7,20	170	180	-34,3	2169,0	2095,4	342,8	342,8
4,5	17,49	14,79	170	180	-60,2	2143,6	2003,8	601,9	601,9
4,6	20,92	19,81	175	180	-75,2	2122,9	1923,9	752,1	752,1
4,7	20,85	21,77	155	160	-78,4	2110,9	1910,5	783,6	783,6
4,8	9,06	20,59	135	140	-55,1	2139,2	2054,7	550,8	550,8
4,9	-13,57	16,30	115	120	-5,2	2239,1	2226,9	51,7	51,7
5	-9,35	9,27	135	135	0,2	2187,3	2186,7	-1,6	-1,6

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 35. Par mínimo acotado a 30 grados función seno con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,72	-3,33	30	155	0,0	3554,4	763,6	0,2	0,2
2,1	4,30	-11,73	45	160	-0,1	3188,5	1161,3	1,4	1,4
2,2	8,46	-17,97	50	175	1,0	2950,3	1468,3	-9,8	-9,8
2,3	13,48	-21,30	70	150	-0,1	2750,9	1761,7	0,6	0,6
2,4	16,51	-21,49	85	140	-0,3	2576,8	1984,0	2,8	2,8
2,5	17,69	-18,55	110	125	-0,4	2334,8	2206,7	3,9	3,9
2,6	12,01	-12,64	125	145	0,3	2250,4	2167,8	-3,2	-3,2
2,7	4,52	-4,44	150	175	-0,1	2156,6	2173,0	0,7	0,7
2,8	8,67	4,64	170	180	-25,1	2170,3	2119,7	251,1	251,1
2,9	15,87	12,80	170	180	-53,6	2153,1	2030,3	536,3	536,3
3	20,11	18,65	180	180	-71,7	2136,2	1936,0	717,4	717,4
3,1	20,47	21,52	150	150	-77,3	2100,4	1929,5	772,6	772,6
3,2	-1,41	21,26	120	120	-38,9	2121,1	2215,4	388,7	388,7
3,3	-20,09	17,86	115	90	0,1	2156,2	2407,4	-1,2	-1,2
3,4	-12,45	11,57	145	110	-0,2	2117,1	2295,7	2,0	2,0
3,5	-5,05	3,13	175	140	3,6	2160,1	2166,7	-35,9	-35,9
3,6	-9,15	-5,93	175	170	28,3	2110,6	2170,1	-282,6	-282,6
3,7	-16,22	-13,83	170	180	55,8	2003,2	2166,6	-557,9	-557,9
3,8	-20,55	-19,26	170	180	73,4	1923,7	2135,1	-733,6	-733,6
3,9	-18,29	-21,68	140	150	74,0	1960,2	2098,0	-740,0	-740,0
4	15,15	-20,96	110	120	9,8	2317,8	2216,3	-98,4	-98,4
4,1	21,16	-17,11	135	90	0,0	2050,3	2515,8	-0,1	-0,1
4,2	10,94	-10,44	165	120	0,1	2139,0	2253,6	-1,2	-1,2
4,3	6,33	-1,80	180	150	-8,7	2183,8	2140,1	87,0	87,0
4,4	11,00	7,20	170	180	-34,3	2169,0	2095,4	342,8	342,8
4,5	17,49	14,79	170	180	-60,2	2143,6	2003,8	601,9	601,9
4,6	20,92	19,81	175	180	-75,2	2122,9	1923,9	752,1	752,1
4,7	19,16	21,77	145	150	-75,3	2111,2	1933,8	752,8	752,8
4,8	-6,36	20,59	115	120	-28,4	2162,9	2241,5	284,2	284,2
4,9	-15,28	16,30	105	125	0,2	2322,3	2163,2	-2,4	-2,4
5	-9,35	9,27	135	135	0,2	2187,3	2186,7	-1,6	-1,6

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 36. Par mínimo acotado a 40 grados función seno con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	0,72	-3,33	30	155	0,0	3554,4	763,6	0,2	0,2
2,1	4,30	-11,73	45	160	-0,1	3188,5	1161,3	1,4	1,4
2,2	11,89	-17,97	80	120	-0,5	2694,4	1766,5	5,2	5,2
2,3	13,48	-21,30	70	150	-0,1	2750,9	1761,7	0,6	0,6
2,4	16,51	-21,49	85	140	-0,3	2576,8	1984,0	2,8	2,8
2,5	17,69	-18,55	110	125	-0,4	2334,8	2206,7	3,9	3,9
2,6	12,01	-12,64	125	145	0,3	2250,4	2167,8	-3,2	-3,2
2,7	4,52	-4,44	150	175	-0,1	2156,6	2173,0	0,7	0,7
2,8	8,67	4,64	170	180	-25,1	2170,3	2119,7	251,1	251,1
2,9	15,87	12,80	170	180	-53,6	2153,1	2030,3	536,3	536,3
3	19,79	18,65	130	140	-71,1	2097,2	1978,8	711,1	711,1
3,1	-15,02	21,52	90	100	-16,9	2149,0	2389,3	168,6	168,6
3,2	-21,65	21,26	90	85	-0,1	2297,0	2340,7	0,7	0,7
3,3	-20,09	17,86	115	90	0,1	2156,2	2407,4	-1,2	-1,2
3,4	-6,10	11,57	80	80	-0,2	2839,2	1524,1	1,9	1,9
3,5	-4,15	3,13	120	55	0,1	1874,2	2450,7	-0,9	-0,9
3,6	5,70	-5,93	105	75	-0,1	2220,8	2117,9	0,8	0,8
3,7	14,80	-13,83	105	75	0,3	2140,3	2314,2	-3,3	-3,3
3,8	13,97	-19,26	85	115	-0,3	2607,3	1892,3	2,7	2,7
3,9	19,34	-21,68	95	105	0,0	2429,4	2178,3	-0,1	-0,1
4	20,33	-20,96	85	95	0,1	2337,0	2275,6	-0,9	-0,9
4,1	17,85	-17,11	125	115	-0,1	2219,4	2305,9	0,9	0,9
4,2	10,26	-10,44	135	145	0,0	2211,5	2176,3	-0,1	-0,1
4,3	2,46	-1,80	175	180	-1,2	2156,1	2163,2	12,3	12,3
4,4	11,00	7,20	170	180	-34,3	2169,0	2095,4	342,8	342,8
4,5	17,49	14,79	170	180	-60,2	2143,6	2003,8	601,9	601,9
4,6	19,00	19,81	130	140	-71,7	2100,8	1970,5	716,5	716,5
4,7	-16,76	21,77	90	100	-13,0	2198,8	2369,2	129,8	129,8
4,8	-21,80	20,59	95	80	0,1	2253,6	2375,6	-0,8	-0,8
4,9	-8,45	16,30	75	75	0,0	2894,9	1513,9	-0,2	-0,2
5	-1,14	9,27	35	115	0,6	3914,2	409,2	-6,2	-6,2

Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando

Tabla 37. Par máximo función seno con A=0,1

xd [m]	AngT [°]	AngD [°]	At [°]	Ad [°]	PAR [Nm]	Nt [N]	Nd [N]	Ft [N]	Fd [N]
2	21,43	-3,33	25	70	-90,4	4715,7	-351,6	903,7	903,7
2,1	21,20	-11,73	25	85	-80,1	4324,4	161,2	801,0	801,0
2,2	-1,04	-17,97	40	15	87,3	-1290,3	5594,3	-872,7	-872,7
2,3	-6,14	-21,30	45	10	96,8	-1280,0	5510,2	-968,2	-968,2
2,4	-6,55	-21,49	65	20	91,0	-805,3	5028,9	-910,0	-910,0
2,5	-7,70	-18,55	80	20	73,9	-490,7	4713,3	-739,4	-739,4
2,6	-21,07	-12,64	25	50	64,2	2270,1	1872,0	-642,2	-642,2
2,7	-21,46	-4,44	25	60	58,1	2742,7	1510,6	-581,4	-581,4
2,8	-21,80	4,64	25	65	53,6	3066,4	1317,9	-536,0	-536,0
2,9	21,79	12,80	110	180	-65,5	2212,7	1921,2	655,2	655,2
3	21,80	18,65	130	180	-74,9	2134,7	1917,1	749,3	749,3
3,1	21,80	21,52	180	175	-79,7	2123,0	1888,6	796,9	796,9
3,2	21,17	21,26	0	0	-77,9	4588,4	-564,5	779,1	779,1
3,3	21,78	17,86	15	20	-85,5	5636,6	-1573,5	855,4	855,4
3,4	21,79	11,57	25	45	-92,0	5408,5	-1257,1	920,0	920,0
3,5	21,66	3,13	25	60	-93,9	5014,9	-743,4	939,1	939,1
3,6	21,38	-5,93	25	75	-87,8	4587,4	-185,7	878,4	878,4
3,7	21,13	-13,83	25	90	-76,4	4225,4	290,8	763,8	763,8
3,8	-1,33	-19,26	45	15	92,5	-1236,7	5536,1	-924,7	-924,7
3,9	-4,89	-21,68	55	15	96,8	-1038,2	5284,5	-967,9	-967,9
4	-6,83	-20,96	70	20	87,3	-722,2	4944,4	-873,2	-873,2
4,1	-21,37	-17,11	20	35	69,7	1633,1	2445,0	-696,6	-696,6
4,2	-20,95	-10,44	25	55	62,4	2493,1	1679,9	-623,6	-623,6
4,3	-21,75	-1,80	25	60	56,5	2815,9	1474,5	-565,3	-565,3
4,4	21,80	7,20	100	175	-56,9	2296,9	1916,2	569,0	569,0
4,5	21,79	14,79	120	165	-68,7	2185,3	1920,7	686,7	686,7
4,6	21,79	19,81	150	160	-76,8	2118,5	1917,2	768,3	768,3
4,7	21,69	21,77	175	180	-79,9	2109,4	1900,2	799,1	799,1
4,8	21,62	20,59	5	5	-80,2	4831,3	-804,2	802,5	802,5
4,9	21,79	16,30	20	30	-88,2	5730,4	-1645,7	881,9	881,9
5	21,78	9,27	25	50	-93,3	5304,9	-1121,1	933,3	933,3